

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al-12Si VE Al-12Si+Al MATRİSLİ B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ
KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME
TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Caner SÖNMEZ**

Anabilim Dalı : Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme Mühendisliği

OCAK 2010

**Al-12Si VE Al-12Si+Al MATRİSLİ B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ
KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME
TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Caner SÖNMEZ
(506061425)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2010**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. E.Sabri KAYALI (İTÜ)
Prof. Dr. Mehmet KOZ (MÜ)**

OCAK 2010

Değerli Aileme,

ÖNSÖZ

Al₁₂-Si ve Al₁₂Si+Al matrisli B₄C takviyeli kompozit kaplamaların soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği ile üretimini ve ardından karakterizasyonunu gerçekleştirdiğim bu çalışmamın birçok aşaması İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesindeki laboratuvarlarda yapılmıştır. Kaplamaların mikroskobik incelemeleri ve element haritalandırma çalışmaları TÜBİTAK MAM’ da yapılmıştır.

Çalışmalarım sırasında, tüm aşamaları yönlendiren ve koordinasyonu sağlayan, bilgi ve tecrübelerini bu aşamalara yansıtan, gösterdiği ilgi ile çalışmanın hedefine uygun olmasını sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU’ na, uygulamalar sırasında yaşanan problemlerin çözümüne ve bulguları yorumlamama büyük bir ilgi ile destek veren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN’ a, çalışmaların yönünü çizmemde ve her aşamada tüm detayları paylaştığım ve bu çalışmaya son derece kritik katkılar sağlayan, verdiği emeği hiçbir zaman gözardı edemeyeceğim Arş. Gör. Onur MEYDANOĞLU’ na, karakterizasyon çalışmalarında yardımını esirgemeyen Arş.Gör. Mert GÜNYÜZ’ e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde, maddi ve manevi her türlü desteğini üzerimde hissettiğim, tüm fedakarlıklarıyla beni yetiştirip bugünlere taşıyan değerli aileme, çalışmalarım sırasında motivasyonumun hep yüksek olmasını sağlayan arkadaşlarıma derin bir minnet ve şükran borçluyum.

OCAK 2010

Caner Sönmez

Metalurji Ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ (SDGP)	3
2.1 SDGP Tarihçesi.....	3
2.1.1 SDGP Tanımı Ve Avantajları	4
2.2 SDGP Kaplama mekanizması ve parametreleri	10
2.3 SDGP İle İlgili Örnek Çalışmalar	19
2.3.1 Ni kaplı Al_2O_3 kompozit kaplamaların SDGP yöntemi ile üretilmesi.....	19
2.3.2 SDGP ile Al-12Si matrisli SiC partikül takviyeli kompozit üretimi	22
2.3.3 SDGP ile üretilen Al-Ni ve Al-Ti kompozit kaplamalara uygulanan ısıtıl işlem sonrası metallerarası bileşiklerin elde edilmesi.....	25
2.3.4 Al-12Si SDGP ile kaplanması ve karakterizasyonu	29
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
3.1 Amaç	35
3.2 Kaplamada Kullanılan Tozlar Ve Karakterizasyonu	35
3.3 Kaplamada Kullanılan Tozların Hazırlanması Ve Kaplama İşlemi.....	38
3.4 Kaplamaların Karakterizasyonu	38
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	41
4.1 Kaplamaların Yapısal Özellikleri.....	41
4.1.1 Matrisin yapısal özellikleri.....	41
4.1.2 Matrisin sertliği	44
4.1.3 Bor karbür takviyesi ile kompozit kaplamaların yapısal özellikleri	45
4.1.4 B_4C takviyesi ile üretilen kompozit kaplamaların sertliği	51
4.2 Aşınma Deneyi.....	52
4.2.1 Kuru ortamda aşınma deneyi	52
4.2.2 Sulu ortamda aşınma deneyleri	58
4.3 Korozyon Deneyi	62
5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
EKLER.....	69

KISALTMALAR

SDGP	: Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme
SEM	: Scanning electron microscope
XRD	: X-ray diffractometer
EDS	: Energy dispersive spectrometer

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Portatif tip ve istasyon tip cihazlar arası parametre farkları	6
Çizelge 2.2: Şekil 2.29.a beyaz ok ile gösterilen kısımdan alınan EDS sonucu ...	21
Çizelge 3.1: Matris malzemesi olarak kullanılan tozlar	35
Çizelge 4.1: “Al-12Si ve Al-12Si+Al” matrisli B4C takviyeli kaplamalara ait kararlı hal sürtünme katsayısı grafikleri	55
Çizelge 4.2: Kuru-sulu ortam karşılaştırılmalı kararlı hal sürtünme katsayıları ..	59
Çizelge A.1: Değişen bor karbür içeriğine göre sertlik değerleri	69
Çizelge A.2: Matris kaplamaların ortalama sertlik ve standart sapma değerleri...	69
Çizelge A.3: Aşınma profillerinden hesaplanan aşınma izi alanları değerleri.	73
Çizelge A.4: Sulu ortam aşınma izi profillerinden hesaplanan aşınma izi alanları değerleri.	75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : SDGP şematik gösterimi	1
Şekil 2.1 : a-) Portatif tip b-) İstasyon tipi	4
Şekil 2.2 : İstasyon tipi cihaz kurulumu şematik gösterimi.....	5
Şekil 2.3 : Portatif tip cihaz kurulumu şematik gösterimi	5
Şekil 2.4 : Portatif tip cihazın önemli parçaları a-) Nozül b-) Toz besleme ünitesi c-) Tabanca	6
Şekil 2.5 : SDGP cihazı ekipmanları. 1-Nozül, 2- Gaz ısıtıcı, 3- Toz besleyici, 4- Sıkıştırılmış hava kaynağı, 5- Helyum gaz kaynağı, 6- Püskürtme alanı, 7- Altlık tutucu ekipman, 8- Sistem parametre kontrol paneli (gaz basıncı, gaz sıcaklığı), 9- Partikül seperatörü.....	7
Şekil 2.6 : a-) Boru içe ve dış çeper korozyon koruma amaçlı SDGP kaplama, b-) Kaynak dikişi koruma amaçlı SDGP kaplama, c-) Otomotiv parçalarında korozyon koruma amaçlı SDGP kaplama, d-) Otomotiv parçalarında korozyon koruma amaçlı SDGP kaplama	9
Şekil 2.7 : Isı direncini arttırmak amaçlı SDGP ile kaplanan termal bariyerler.	9
Şekil 2.8 : Elektriksel iletkenliği artırma amaçlı Al ve Cu kaplamaları.....	9
Şekil 2.9 : Kimyasal olarak birbirinden farklı malzemeleri birbirine kaynatma amaçlı yapılan SDGP kaplamalar	10
Şekil 2.10 : Parçalardaki hataların onarımı amaçlı yapılan SDGP kaplamalar	10
Şekil 2.11 : Gemi pervaneleri için kaymayı önleyici SDGP kaplamalar	10
Şekil 2.12 : Lazer saçılma tekniği ile çekilen partikül yörünge fotoğrafları.	11
Şekil 2.13 : a-) Al partikülleri b-) 730 m/s hızla Cu yüzeyine Al partikül etkisi c-) 780 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partikül etkisi d-) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partikül etkisi	12
Şekil 2.14 : Kaplama öncesi yüze işlem görmüş Cu üzerine kaplanan Al partikülleri	13
Şekil 2.15 : Al partiküllerinin morfolojisi	13
Şekil 2.16 : Parlatılmış Cu altlık üzerine farklı hızlarda püskürtülen Al partiküllerinin deformasyonu.	14
Şekil 2.17 : Yüzeyi parlatılmış Cu altlık üzerine farklı hızlarda püskürtülen Al partiküllerinin deformasyonu a-) 625 m/s, b-) 730 m/s, c-) 850 m/s.	15
Şekil 2.18 : Partikül hızı-gecikme zamanı grafiği.	17
Şekil 2.19 : Kaplama öncesi seken partiküllerin hazırladığı yüzeyin mikroyapı fotoğrafı.....	18
Şekil 2.20 : a-) Kaplamada kullanılan Ni kaplı Al_2O_3 partiküllerin SEM görüntüleri. b-) Ni kaplı Al_2O_3 partikül. c-) Daha büyük büyütmede partikül d-) Partikülün kesit alanından alınan OM görüntüsü.	19
Şekil 2.21 : Ni- Al_2O_3 kompozit kaplamasının optik mikroskop görüntüleri	20

Şekil 2.22 : Ni-Al ₂ O ₃ kompozit kaplamanın SEM görüntüleri a-) Geri saçılan elektronlar ile elde edilen görüntü. b-) İkincil elektronlar ile elde edilen görüntü.	20
Şekil 2.23 : Yapıya dahil olan ve yapıdan ayrılan Al ₂ O ₃ partiküllerinin şematik gösterimi.	21
Şekil 2.24 : Ni-Al toz ve kaplama XRD sonuçları.	21
Şekil 2.25 : a-) Al-12Si morfolojisi, b-) SiC morfolojisi.	22
Şekil 2.26 : Hacimce a-) %20 SiC, b-) %30 SiC, c-) %40 SiC, d-) %50 SiC içeren Al-12Si-SiC kompozit kaplamaların kesit alanlarından alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.	23
Şekil 2.27 : Sertlik-SiC kompozisyon grafiği.	24
Şekil 2.28 : SiC tane boyutu- Sertlik grafiği.	24
Şekil 2.29 : a-) Al b-) Ni c-) Ti partiküllerinin taramalı elektron mikroskop görüntüleri.	25
Şekil 2.30 : a-) Al-Ni, x500 b-) Al-Ti, x500 parlatılmış optik mikroskop görüntüleri.	26
Şekil 2.31 : a-) 500 °C’ de ısıtılma işlem görmüş, x500 Al-Ni b-) 630 °C’ de ısıtılma işlem görmüş Al-Ti, x500 kompozit kaplamaların kesit alanından alınan optik mikroskop görüntüleri.	26
Şekil 2.32 : a-) Al-Ni b-) Al-Ti kompozit kaplamaların ısıtılma işlem sonrası ve öncesi X-ışını difraksiyon analiz sonuçları.	27
Şekil 2.33 : a-) 450 °C b-) 550 °C’ de ısıtılma işlem görmüş Al-Ni kaplamanın EDS analizi.	28
Şekil 2.34 : a-) 450 °C ‘de b-) 630 °C’ de ısıtılma işlem görmüş Al-Ti kaplamanın EDS analizi.	28
Şekil 2.35 : Al-Ni, Al-Ti kompozit kaplamaların sertlik-sıcaklık grafiği.	29
Şekil 2.36 : a-)Al-12Si toz morfolojisi b-) Partikül kesit alanı c-) Yüksek büyütme d-) Si elementinin EDS analizi.	30
Şekil 2.37 : Al-Si Faz Diyagramı.	31
Şekil 2.38 : Kaplama öncesi ve sonrası Al-12Si X-ışını difraksiyon analizi.	31
Şekil 2.39 : 400 °C’de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri.	32
Şekil 2.40 : Tane boyutu –Parçacık hızı grafiği.	32
Şekil 2.41 : 560 C de yapılan kaplamanın optik mikroskop görüntüleri.	33
Şekil 2.42 : Kaplamanın SEM görüntüleri.	34
Şekil 3.1 : Al-12Si toz morfolojisi.	36
Şekil 3.2 : Alfa-aesar Al toz morfolojisi.	36
Şekil 3.3 : Asidik çözeltinin dibine çöken Çin menşeli bor karbür tozlarına ait (a) X-ışınları difraksiyon paterni.	37
Şekil 3.4 : Asit işlemi öncesi bor karbür toz morfolojisi.	37
Şekil 4.1 : SDGP ile kaplanan a-) %100 Al-12Si b-) %50 Al-12Si + %50 Al c-) %75 Al-12Si + %25 Al matrislerinin optik mikroskop görüntüleri (X: arayüzeye yakın bölge; Y:arayüzeye uzak bölge).	42
Şekil 4.2 : %75 Al-12Si + %25 Al tozuyla gerçekleştirilen kaplamanın altlık ara yüzeyine (a) yakın ve (b) uzak bölgelerine ait kimyasal analiz sonuçları. Altlık ara yüzeyine yakın ve uzak bölgeler Şekil 2.b’de sırası ile X ve Y olarak gösterilmiştir.	43
Şekil 4.3 : Hacimce %75 alüminyum-12 silisyum + %25 alüminyum içeren matris üzerinde yapılan element haritalandırma çalışmalarına ait fotoğraflar.	44

Şekil 4.4 : Alüminyum ve alüminyum - 12 silisyum tozları ile yapılan matris çalışmalarından elde edilen sertlik sonuçları.	45
Şekil 4.5 : %100 Al-12Si ve %75Al-12Si+%25 Al matrisine sahip a-) %5, b-) %10 ve c-) %20 B ₄ C partikül takviyeli kaplamaların kesitlerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	46
Şekil 4.6 : %100 Al-12Si ve %75 Al-12Si+%25 Al matrisine sahip (a) %5, (b) %10 ve (c) %20 bor karbür takviyeli kompozit kaplamaların kesitlerine ait büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri. .	48
Şekil 4.7 : (a) %75 alüminyum – 12 silisyum + %25 alüminyum matrisli % 5 bor karbür içeren kaplamanın ve (b) alüminyum – 12 silisyum matrisli %20 bor karbür içeren kaplamanın taramalı elektron mikroskop görüntüleri ve kimyasal analiz sonuçları. (fotoğraflardaki çerçevelendirilmiş bölgeler için).	49
Şekil 4.8 : %20 bor karbür içeren (a) %100 Al - 12Si matrisli ve (b) %75 Al - 12Si + %25 alüminyum matrisli kompozit kaplamaların X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları.	50
Şekil 4.9 : “Al-12Si ve Al-12Si+Al” tozlarına ilave edilen B ₄ C’nin kaplama sertliğine etkisi	52
Şekil 4.10 : “Al-12Si ve Al-12Si+Al” matrisli kompozit kaplamanın aşınma oranına B ₄ C miktarının etkisi.....	53
Şekil 4.11 : Aşınma oranı-sertlik grafiği.	54
Şekil 4.12 : İncelenen kaplamaların sürtünme katsayısı grafikleri.....	55
Şekil 4.13 : % 100 Al-12Si matrisli %20 B ₄ C takviyeli kaplamadaki aşınma izinin siyah renkli bölgelerin EDS analizi.....	56
Şekil 4.14 : Aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	57
Şekil 4.15 : Su ortamında aşınma oranı-kompozisyon değişimi grafiği.....	58
Şekil 4.16 : Sulu ortamda sürtünme katsayısı-sürtünme kuvveti grafikleri.....	59
Şekil 4.17 : Aşınma sonrası alümina aşındırıcı top izlerinin optik mikroskop görüntüleri.	60
Şekil 4.18 : Aşınma izlerinin küçük ve büyük büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	61
Şekil 4.19 : Korozyon yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	62
Şekil 4.20 : Korozyon deneyi sonucu elde edilen E (korozyon potansiyeli)-I (akım yoğunluğu) grafiği.....	63
Şekil A.1 : % 100 matrisli sırasıyla %5, %10, %20 B ₄ C takviyeli kompozit kaplamaların optik mikroskop görüntüleri	70
Şekil A.2 : % 75 Al-12Si+%25 Al matrisli sırasıyla %5, %10, %20 B ₄ C takviyeli kompozit kaplamaların optik mikroskop görüntüleri.....	71
Şekil A.3 : Kuru ortam aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınma profilleri.	72
Şekil A.4 : Sulu ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınma profilleri.....	74
Şekil A.5 : %75 Al-12Si+%25 Al matrisli sırasıyla %5, %10 ve %20 bor karbür takviyeli kompozit kaplamaların aşınma deneyi sonrası elde edilen Al ₂ O ₃ aşındırıcı top izlerinin optik mikroskop görüntüleri.....	76
Şekil A.6 : %100 Al-12Si+%25 Al matrisli sırasıyla %5, %10 ve %20 bor karbür takviyeli kompozit kaplamaların aşınma deneyi sonrası elde edilen Al ₂ O ₃ aşındırıcı top izlerinin optik mikroskop görüntüleri.....	77

Al-12Si VE Al-12Si+Al MATRİSLİ B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Soğuk gaz dinamik püskürtme teknolojisi ilk defa; 1980’li yılların ortalarında Novosibirsk’te Rus Bilimler Akademisi Teorik Ve Uygulamalı Mekanik Bilimler Enstitüsü’nde Profesör Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından, bir hava akımı içinde ses hızından daha yüksek hızlarda iki fazlı (gaz+katı parçacıklar) akış çalışmalarının modellenmesi sırasında ortaya çıkmıştır. Söz konusu bilim adamları bu yöntemle birçok farklı malzeme üzerine metal, metal alaşımları ve kompozitten oluşan birbirinden farklı kaplamaları oluşturabilmiş ve soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinin (SDGP) birçok alanda uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır. Amerika patenti 1994’te Avrupa patenti ise 1995’te alınmıştır.

Bu çalışmada, 6082 kalite Al alaşımı malzeme üzerine SDGP yöntemi ile kompozit kaplamaların üretilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla Al-12Si, Al ve B₄C tozları kuru karıştırıcıda karıştırılarak SDGP için besleme tozları oluşturulmuştur. Besleme tozu 5 bar basınçta ve taşıyıcı gaz olarak hava kullanılarak püskürtülmüştür. Kaplamalar mikroskobik incelemeler, X-ışınları difraksiyon analizi, sertlik ölçümleri, aşınma ve korozyon deneyleri ile karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonuçları şu şekilde özetlenmiştir:

- i.) Bor karbür takviyesi olmayan matris kompozit kaplamalarda Al-12Si tozuna Al ilavesi ile sertlik düşmektedir. Sırasıyla 100% Al-12 Si ve 75% Al12Si+25%Al matris kompozit kaplamaların ortalama sertlikleri $99,8 \pm 13$ Hv_{0,05} and $70,5 \pm 9$ Hv_{0,05} olarak ölçülmüştür. Matrislere B₄C ilavesi ile sertlik radikal bir şekilde artmaktadır. . Örneğin %100 Al-12Si matrise %20 B₄C ilave edilmesi ile sertlik 217 ± 21 Hv_{0,05} olarak ölçülmüştür.
- ii.) Sertlik artışına bağlı olarak yapıda B₄C konsantrasyonunun artmasıyla aşınma direnci de artmaktadır. Lakin; %10 oranından fazla B₄C miktarının aşınma direncini değiştirmede rolü yoktur.
- iii.) Sulu ortamda yapılan aşınma deneyinde kuru ortama kıyasla aşınma direnci büyük oranda artmış sürtünme katsayısı da hemen hemen aynı oranda düşmüştür.
- iv.) Bor karbür miktarının artmasıyla korozyon direnci düşmüştür.

CHARACTERISTICS OF B₄C REINFORCED Al-12Si AND Al-12Si+Al MATRIX COMPOSITES DEPOSITED BY COLD SPRAY PROCESS

SUMMARY

The cold spray process was originally developed in the mid-1980s at the Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences in Novosibirsk by Dr. Anatolii Papyrin and his colleagues while studying models subjected to a supersonic two-phase flow (gas+solid particle) in a wind tunnel. They successfully deposited a wide range of pure metals, metal alloys and composites onto a variety of substrate materials and demonstrated the feasibility of the cold spray process for various applications. A US patent was issued in 1994 and the European patent in 1995.

This study was aimed to deposit a composite coating on 6082 Al alloy substrate via cold spray process. For this purpose Al-12Si, Al and B₄C particles were dry-blended as the feed stock powder. Deposition of the feed stock powder was conducted at 5 bar by utilizing air as the accelerating gas. Characteristics of the composite coatings were made by microscopic examinations, X-ray diffraction analysis, hardness measurements, wear tests and corrosion tests. The results of the characterization tests are summarized below;

- i.) In B₄C free coatings, addition of Al powders into the Al-12Si powders yield lower hardness value. The hardnesses of the 100% Al-12 Si and 75% Al12Si+25%Al matrix composites were measured as $99,8 \pm 13 \text{ Hv}_{0,05}$ and $70,5 \pm 9 \text{ Hv}_{0,05}$, respectively. In corporation of B₄C particles into the coating caused remarkable increment in the hardness value. For example addition of 20% B₄C into Al-12Si induced hardness value of $217 \pm 21 \text{ Hv}_{0,05}$.
- ii.) In accordance with the increment in hardness, presence of B₄C particles in the coatings caused an enhancement in the wear resistance. However, presence of B₄C particles more than 10% did not provide further enhancement in wear resistance of the coating under dry sliding wear testing conditions.
- iii.) When compared to the dry sliding wear tests, composite coatings exhibited lower wear rate and friction coefficient in wear tests conducted in water.
- iv.) In corporation of B₄C particles in the Al-12Si matrix resulted in a decrease in corrosion resistance.

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın konusu; Al-12Si veya Al-12Si + Al matrisli B₄C partikül takviyeli kompozit kaplamaları, yeni trend soğuk dinamik gaz püskürtme kaplama teknolojisi ile üretmektir. Bu kapsamda farklı oranlarda toz karışımına sahip Al-12Si ve Al-12Si + Al matrisli ve bu matrislere karıştırılan yine farklı oranlarda B₄C partiküllerden oluşan, toz karışımları 6082 kalite Al alaşımı üzerine SDGP yöntemi ile 5 bar basınçlı kurutulmuş hava kullanılarak kaplanmıştır. Ardından mekanik karakterizasyon adına mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri, aşınma ve korozyon testleri yapılmıştır. Matrislerin ve farklı B₄C oranlarının ve kaplama öncesi toza uygulanan işlemlerin bu bağlamda etkisi araştırılmıştır.

SDGP yöntemi, temelde yüksek basınçlı sıkıştırılmış gaz içinde depolanan enerjinin ince taneli toz partikülleri (5-100 µm) yüksek hızlarda (500-1500 m/s) püskürtmek için kullanılmasıdır. Sıkıştırılan gaz, kurutucu üniteden geçtikten sonra soğuk gaz dinamik püskürtme cihazının tabancasına iletilir ve bu tabancanın ucunda bulunan özel tasarlanmış (başlangıçta daralan çıkış noktasına doğru genişleyen) nozülünden yüksek hızlarda dışarı çıkar. Diğer yandan cihazın yüksek basınçlı toz besleme ünitesinden tabancaya iletilen tozlar bu yüksek hızdaki hava akışı ile birleşerek bir kaplama jeti oluşturur. Bu akım içerisinde bulunan toz partiküller kaplanacak yüzeye hızlıca çarparak yüzeyde plastik deformasyona neden olurlar ve fiziksel olarak malzemeye bağlanırlar.



Şekil 1.1 : SDGP şematik gösterimi [1].

Bu yöntem oda sıcaklığında gerçekleştirildiğinden yöntemin adı soğuk dinamik gaz püskürtme olarak nitelendirilmiştir. Her ne kadar sıkıştırılmış gaz, yüksek basınç etkisiyle, nozülünden çıkarken yaklaşık 100°C civarında bir sıcaklığa ulaşsa da bu sıcaklıkta toz partiküllerinin ve kaplanacak malzemenin kimyasal bozunumundan söz edilemez. Dolayısıyla kaplama sırasında herhangi bir difüzyon olayı gerçekleşmez, yani üretim sürecinde oluşan kaplamaların yapısında kimyasal bir bozunumdan söz etmek mümkün değildir. Böylelikle kaplama sırasında herhangi bir faz değişimi, kalıntı gerilme oluşumu, kaplanacak ve kaplanan malzemelerin termal genleşme farklılıklarından dolayı özellikle arayüzeyde herhangi bir iç gerilme oluşumu, oksitlenme, buharlaşma, ergime, kristalleşme, bağların kopması, istenmeyen gazların açığa çıkması, soğuma hızının kontrol edilememesinden kaynaklanan büzülme gibi sorunlardan bahsedilemez.

Kaplamalarda en önemli sorunlardan biri oksitlenme problemidir. Çünkü kaplama sırasında oluşacak olası bir oksit filmi bağ mukavemetini oldukça düşürecektir bu da kaplamanın yapışma kabiliyetinin yetersiz olması anlamına gelir. Bununla beraber termal genleşme farklılıklarından arayüzeyde oluşan gerilmeler kaplamanın bağlanmasını engeller ve en düşük gerilmelerde bile kaplamanın yüzeyden ayrılmasına sebep olur. Prensip olarak termal spreyci sürecine benzer olmakla beraber prosesin içinde sıcaklık parametresi olmadığı için yukarıda bahsi geçen problemler termal spreyci sürecinde oluşabilecek muhtemel problemlerdir fakat soğuk gaz dinamik püskürtmede böyle sorunlar ortaya çıkmaz. Bu; birçok endüstri alanında, birçok farklı metalin farklı malzemelerle kaplanmasında kullanım ve varyasyon avantajı sağlar.

Yüksek hızdaki hava akışı içerisindeki katı parçacıklar kaplanacak malzeme yüzeyine ilk defa ulaşır tamamen kaplandıktan sonra artık kendi içinde üniform bir şekilde birikmeye başlayacaktır. Bunun en büyük avantajı oluşacak kaplamanın üniform, az boşluklu bir yapıya ve yüksek bağ mukavemetine sahip olmasıdır [1-3].

Bu çalışmada alüminyum altlık malzeme üzerine Al-12Si ve Al-12Si + Al matrisli B₄C partikül takviyeli kompozit kaplamaların soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği (SDGP) ile üretimi amaçlanmıştır. Kaplama sonrası malzemenin sertlik değerinde, aşınma ve korozyon direncinde artış beklenmektedir. Takviye edilen B₄C partiküllerinin oranı arttıkça sertliğinin artması, Al-12Si matrisine sahip matrisin aşınma direncinin diğer matrise göre daha yüksek olması hedeflenmektedir.

2. SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ (SDGP)

2.1 SDGP Tarihçesi

Soğuk gaz dinamik püskürtme teknolojisi ilk defa; 1980’li yılların ortalarında Novosibirsk’te Rus Bilimler Akademisi Teorik Ve Uygulamalı Mekanik Bilimler Enstitüsü’nde, Profesör Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından, bir hava akımı içinde ses hızından daha yüksek hızlarda iki fazlı (gaz+kı parçacıklar) akış çalışmalarının modellenmesi sırasında ortaya çıkmıştır. Söz konusu bilim adamları bu yöntemle birçok farklı malzeme üzerine metal, metal alaşımları ve kompozitten oluşan birbirinden farklı kaplamaları oluşturabilmiş ve soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinin birçok alanda uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır.

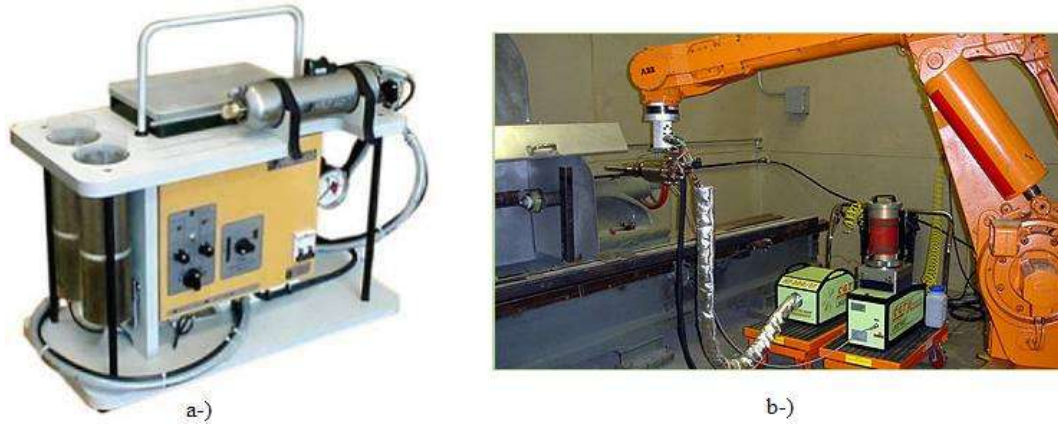
1980’li yıllarda SDGP kaplama mekanizması hakkında tartışmalar ortaya çıkmıştır. Bir grup bilim adamı, kaplamanın oluşabilmesi için yüksek hızlı kaplama jeti içerisindeki partiküllerin yüzeye çarparken ergime noktası sıcaklığında ya da bu sıcaklığa yakın olması gerektiğini savunmuşlardır. Diğer bir grup bilim adamı ise herhangi bir fiziksel değişim olmadığını iddia etmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar da gösteriyor ki; üretilen kaplamalarda partiküllerin sıcaklığı kaplama işlemi sırasında kendi ergime noktalarının altındadır. Dolayısıyla fiziksel bir değişim söz konusu değildir.

Son yıllarda; Rusya’da Rus Bilimler Akademisi Teorik Ve Uygulamalı Mekanik Bilimler Enstitüsü, Amerika Birleşik Devletleri’nde Sandia Ulusal Laboratuvarı, Pennsylvania Devlet Üniversitesi, ASB, Ford Motor, General Electric, General Motors, Pratt & Whitney, Dartmouth Üniversitesi, Rutgers Üniversitesi, Amerikan Ordu Araştırma Laboratuvarı, Delphi Araştırma Laboratuvarında; Almanya’da Federal Silahlı Kuvvetler Üniversitesi, Avrupa Hava Savunma Ve Uzay Araştırma Kurumu, Linde AG Soğuk Gaz Teknolojileri, Siemens; İngiltere’de Cambridge, Nottingham, Liverpool Üniversiteleri’nde, Yasaki Avrupa ve BOC Gaz şirketlerinde, Japonya’da Shinshu Üniversitesi ve Plasma Gigen şirketinde; Kanada’da Windsor Üniversitesi

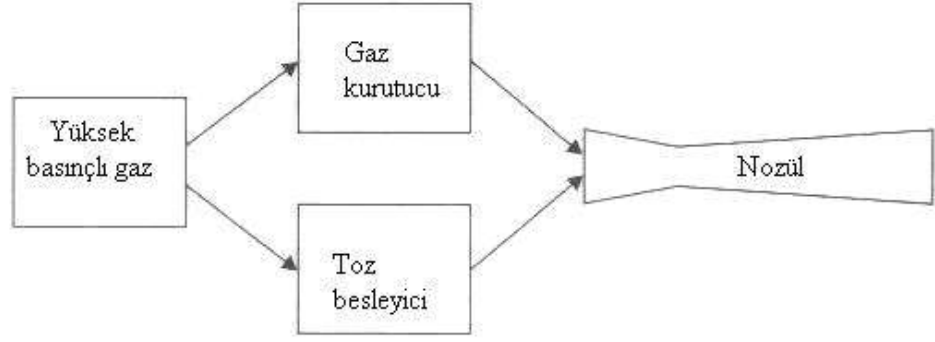
ve Ulusal Araştırma Kurulu'nda; Avustralya'da CSIRO; Brezilya'da Mahle Metal, Güney Kore, Çin ve Hindistan gibi daha birçok ülkede soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği prosesi üzerinde çalışılmaktadır [3].

2.1.1 SDGP tanımı ve Avantajları

SDGP işlemi portatif ve istasyon tipi cihaz kurulumu ile gerçekleştirilebilir. Portatif cihazlarda tabanca operatör tarafından manuel olarak kullanılır. Bu sistemin en büyük handikapı altlık ile tabanca arasındaki mesafenin ve kaplama sırasında tabancanın yüzeye gezdirilmesi anındaki hareket hızının operatörün kontrolünde olmasıdır. Bu ise ardı ardına yapılan kaplamalarda sabit şartlar altında çalışılmasını güçleştirmektedir. İstasyon tipi kurulumlarda böylesine bir problem yoktur zira tabanca özel tasarım bir robot kola bağlıdır. Öbür yandan portatif cihazlarla ulaşılması zor yerlerdeki parçaların kaplama işlemi yapılabilir. Şekil 2.1'de bu iki ayrı tip cihaz kurulumunun fotoğrafları yer almaktadır.



Şekil 2.1 : a-) Portatif tip b-) İstasyon tipi [4]



Şekil 2.2 : İstasyon tipi cihaz kurulumu şematik gösterimi [5]

Şekil 2.2’ de istasyon tipi kurulumun şematik gösterimi yer almaktadır. Burda ana gaz ve toz akışı yüksek basınçlı akım içerisinde nozüle iletilmektedir ve nozül içerisinde karışmaktadır. Bu konfigürasyon toz besleme ünitesinin yüksek basınca uyumlu olmasını gerektirdiğinden genellikle istasyon tipi soğuk gaz dinamik püskürtme cihazlarında görülür.

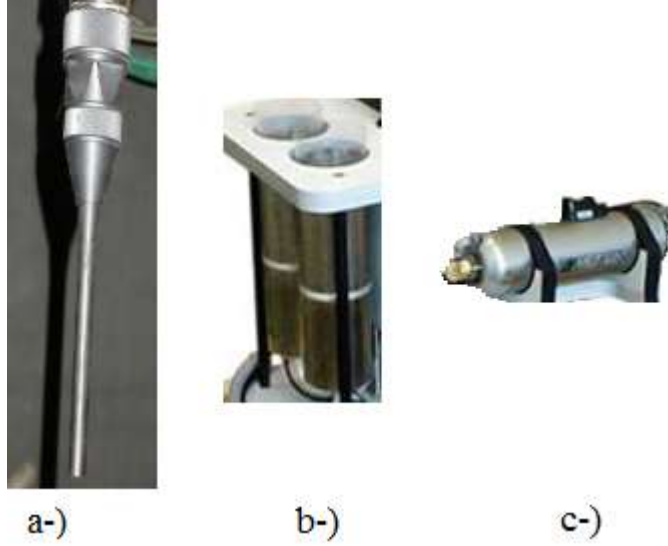


Şekil 2.3 : Portatif tip cihaz kurulumu şematik gösterimi [5].

Şekil 2.3’te ise portatif tip cihaz kurulumunun şematik gösterimi görülmektedir. Burda toz besleme işi düşük basınçta farklı bir noktadan oluşturulan akış ile nozüle iletilir. Bu konfigürasyonda basınçlı besleme ünitesine gerek olmadığından genelde portatif cihazlarda bu sistem kuruludur.

Şekil 2.4’ te portatif tip cihazın önemli parçaları görülmektedir. Nozül tabancanın uç kısmına monte edilen yüzeye gönderilen tozların cihazdan çıktığı son noktadır. Nozül iç çeperi özel olarak tasarlanmıştır. Helezonik girinti ve çıkıntılardan oluşan bir iç çepere sahiptir ve tozun ilk girdiği yerde daralan çıkış noktasına doğru da

genişleyen bir kesite sahiptir. Böylelikle yüksek basıncın etkisiyle gelen toz nozül sayesinde supersonik hzlara ulaşır. Toz besleme ünitesi tabancaya toz tükenene kadar toz beslemesi yapan kısımdır. Tabanca ise, toz ve gazın birleştiği üzerinde bir tetik bulunan ve bu tetiğe basıldığında söz konusu karışımı nozüle ileten kısımdır.



Şekil 2.4 : Portatif tip cihazın önemli parçaları a-) Nozül b-) Toz besleme ünitesi c-) Tabanca [4].

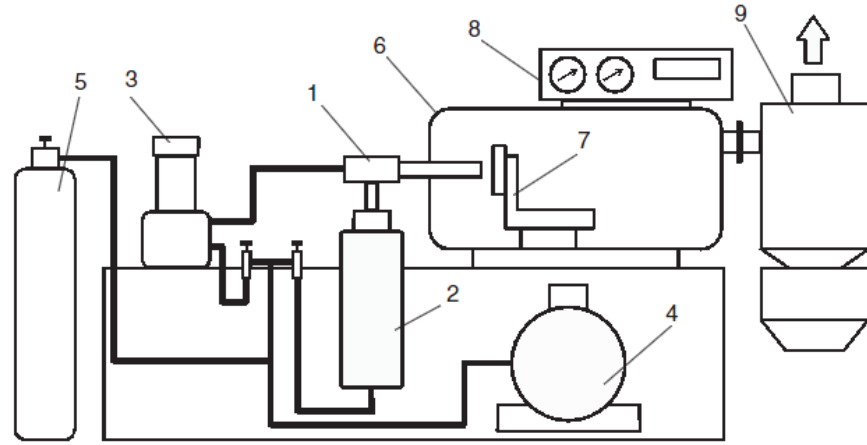
Çizelge 2.1 : Portatif tip ve istasyon tip cihazlar arası parametre farkları [6].

İşlem Parametreleri	İstasyon Tipi Sistemlerde	Portatif Tip Sistemlerde
Kullanılan Gaz	N ₂ , He, Hava	Hava
Gaz Basıncı (bar)	20-45	6-8
Gaz Ön Isıtma (°C)	20-800	20-550
Gaz Akış Hızı (m ³ /sa)	50-150	15-30
Toz Akış Hızı (g/s)	0.1-1.0	0.06-0.1
Parçacık tane boyutu (µm)	5-100	10-50

İki sistem arasında prensip olarak gaz basıncı ve gaz/toz akış hızı gibi farklar göze çarpmaktadır. Portatif bir sistem hazır sıkıştırılmış havayı vakumlayarak kullanırken istasyon tipi sistemler yüksek basınçlı gazları ve bu gazları oluşturmak için kendisine ait yüksek basınç kompresörünü kullanır. Portatif sistemlerde gaz olarak hava kullanılırken istasyon tipi cihazlarda havanın yanında helyum gibi molekül ağırlıkları oldukça düşük gazlar kullanılabilir. Yüksek hızların gerekli olduğu durumlarda helyum kullanılması büyük yarar sağlar. Yapılan araştırmalarda azot ve hava ile yapılan çalışmalara nazaran helyumun iki kat daha fazla hızlı olduğu gözlenmiştir. Bu da partiküllerin iki kat daha fazla hızlanması anlamına gelir ki parçacığın kritik

hızı SDGP tekniğinde çok önemlidir. Belirli bir kritik hıza ulaşamayan partiküllerin altlık malzeme yüzeyine bağlanması beklenemez [5-6].

Şekil 2.5’ te SDGP cihazının ekipmanları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıkıştırılmış hava ve helyum gazı bir noktada karışarak toz besleme ünitesine ve tabancaya iletilmektedir. Toz besleme ünitesine iletilen gaz o noktadan tozla beraber çıkar tabancaya iletilen gazın hızlandırma etkisiyle nozülde supersonik hızlara ulaşarak son noktadan püskürtülür.



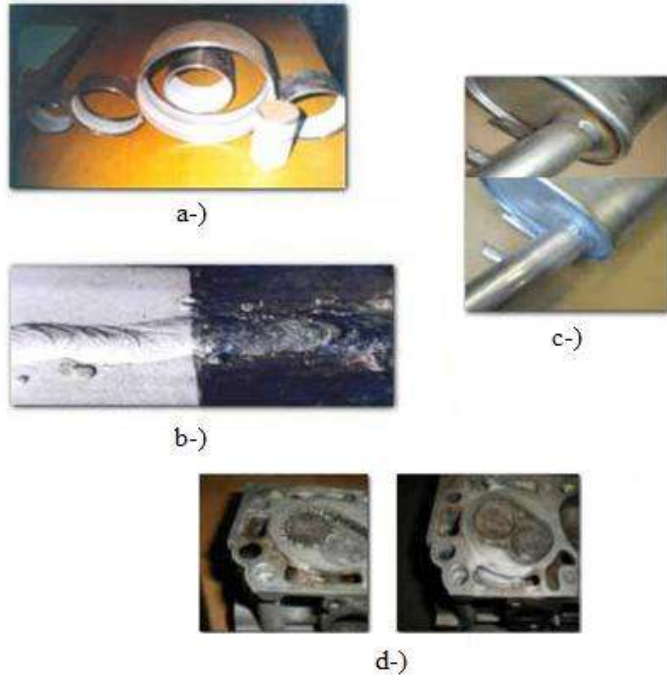
Şekil 2.5 : SDGP cihazı ekipmanları. 1-Nozül, 2- Gaz ısıtıcı, 3- Toz besleyici, 4- Sıkıştırılmış hava kaynağı, 5- Helyum gaz kaynağı, 6- Püsürtme alanı, 7- Altlık tutucu ekipman, 8- Sistem parametre kontrol paneli (gaz basıncı, gaz sıcaklığı), 9- Partikül seperatörü.

SDGP yönteminin diğer klasik kaplama yöntemlerinden en belirli karakteristik farkı düşük sıcaklık ve yüksek parçacık hız parametrelerine sahip oluşudur. Termal spreyden en temel farkı kaplamanın; işlem sırasında katı hali bozulmayan küçük tane boyutlu partiküllerden oluşması ve difüzyondan yoksun olarak gerçekleştirilmesidir [6-7]. Kaplamanın düşük sıcaklıklarda üretilmesi, kaplanan ve kaplanacak malzemenin yüksek sıcaklığın neden olduğu zararlı etkilerden korunması anlamına gelir ve birçok avantaj elde edilir. Bunlar [7];

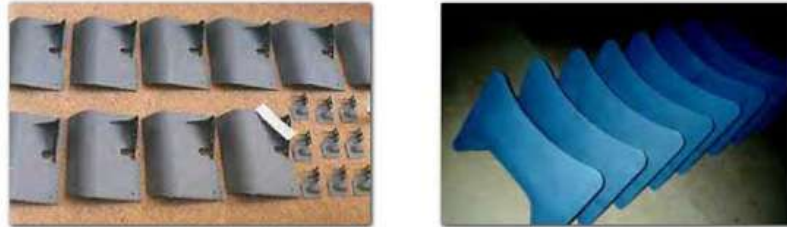
- İstenmeyen faz ve oksidasyon oluşumunun olmaması.
- Kaplanan ve kaplanacak malzemelerin işlem sonrası tüm özelliklerinin aynı kalması.
- Düşük kalıntı gerilme değeri.
- Kaplama boyunca elektrik ve ısıyı kolaylıkla iletilebilmesi.

- Yüksek sertlik, yüksek kaplama yoğunluğu ve soğuk işlem görmüş bir yapı elde edilmesi.
- Isıya duyarlı malzemelerin kaplanabilmesi.
- 5-10 μm tane boyutundan daha küçük boyutlu toz partiküllerin püskürtülebilmesi.
- Altlık ve kaplanacak malzemelerin farklı malzeme grubunda olması halinde bile rahatlıkla çalışılabilmesi.
- Kapanacak olan malzemenin yüzey hazırlama işlemlerinin minimize edilmesi.
- Yüksek hızda toz besleme ve buna bağlı olarak verimlilik artışı.
- Yüksek hızda ve yüksek verimde kaplama yapabilmek.
- Kaplama sırasında saçılan partiküllerin geri dönüşümünün yapılabilmesi.
- Kaplama sırasında altlık malzemede çok düşük sıcaklık artışı görülmesi.
- Yüksek sıcaklığa sahip gaz, radyasyon, patlayıcı gaz gibi tehlikeli unsurların işlem sırasında bulunmayışı dolayısıyla uygulamanın güvenli oluşu.

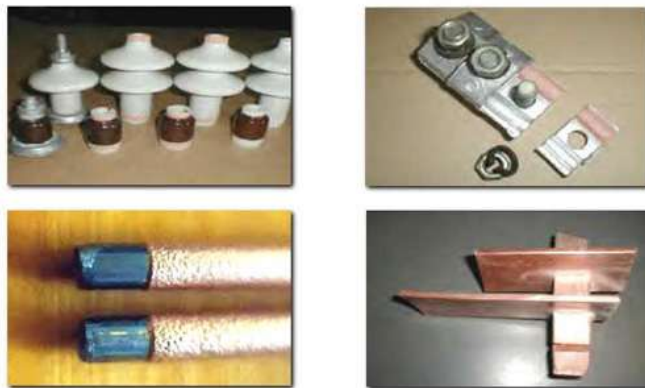
Bu avantajlar, bu yöntemin birçok farklı endüstri kollarında geniş ölçekte değişik parçaların üretiminde ve onarımında kullanılmasını sağlamaktadır. Türbin kanatları, pistonlar, silindir ve valfler, piston segmanları, rulman parçaları, pompa ekipmanları, bağlantı elemanları, miller gibi parçalar örnek olarak gösterilebilir. Birçok farklı kaplama; mukavemet arttırmak, sertlik, aşınma ve korozyon direnci sağlamak, elektro-manyetik ve ısı iletkenliği gibi istenen özelliklere göre oluşturulabilir. Bu faktörlerin en az birini sağlayan farklı tozlar karıştırılarak veya alaşımlandırılarak bu özelliklerin istenilen niteliklerde elde edilmesi mümkündür. Şekil 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 ve 2.11’ de uygulama alanlarına örnek fotoğraflar görülmektedir.[8]



Şekil 2.6 : a-) Boru içe ve dış çeper korozyon koruma amaçlı SDGP kaplama, b-) Kaynak dikişi koruma amaçlı SDGP kaplama, c-) Otomotiv parçalarında korozyon koruma amaçlı SDGP kaplama, d-) Otomotiv parçalarında korozyon koruma amaçlı SDGP kaplama [8].



Şekil 2.7 : Isı direncini arttırmak amaçlı SDGP ile kaplanan termal bariyerler [8].



Şekil 2.8 : Elektriksel iletkenliği artırma amaçlı Al ve Cu kaplamaları [8].



Şekil 2.9 : Kimyasal olarak birbirinden farklı malzemeleri birbirine kaynatma amaçlı yapılan SDGP kaplamalar [8].



Şekil 2.10 : Parçalardaki hataların onarımı amaçlı yapılan SDGP kaplamalar [8].

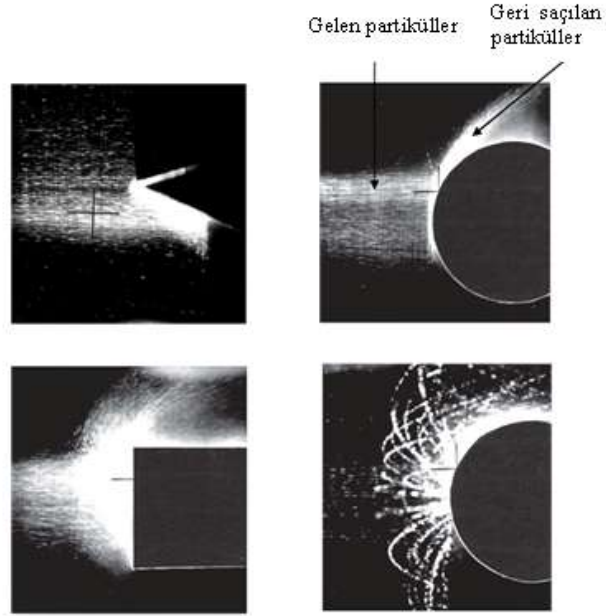


Şekil 2.11 : Gemi pervaneleri için kaymayı önleyici SDGP kaplamalar [8].

2.2 SDGP Kaplama Mekanizması Ve Parametreleri

Birinci bölümde SDGP yönteminde kaplamanın, partiküllerin yüksek hızlarda yüzeye çarparak plastik deformasyona sebep olmasıyla oluştuğundan bahsedilmişti. Bu bölümde partikül hareketleri ve yüzeye ilk temas gibi konular irdelenmiştir.

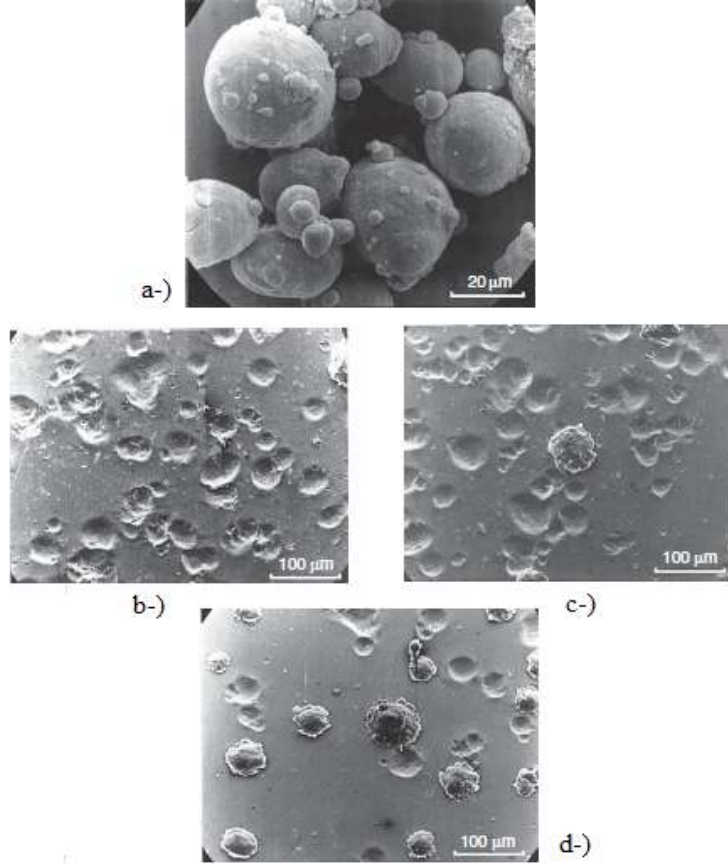
Şekil 2.12’ de püskürtülen partiküllerin hareket yörüngeleri görülmektedir. Kaplanacak malzemeye çarpıp geriye saçılan partiküller açıkça görülmektedir. Geri seken bazı partiküllerin geri dönüş açısı gelme açısıyla aynı veya yakın olduğu zamanlarda bu partiküller geri dönerken kendini yine arkadan gelen akış yoğunluğu içerisinde bulur ve tekrar geri dönerek kaplanacak malzemeye bir daha çarparlar.



Şekil 2.12 : Lazer saçılma metoduyla çekilen toz yörünge fotoğrafları [9].

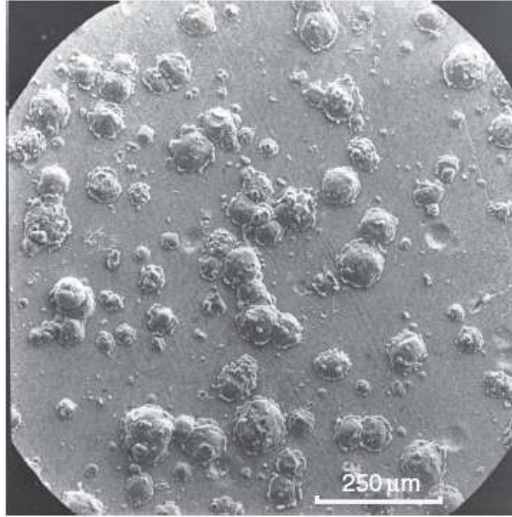
Bu bir döngü içerisinde devam ettikçe, geri dönen partiküllerin geri dönüş mesafeleri zamanla azalır, böylelikle kaplanacak malzeme yüzeyinde bir birikme oluşur. Gelen ve seken partiküller arasındaki yoğun etkileşimden konsantrasyonu giderek artan bir bölge oluşur.

Şekil 2.13’ te farklı Al partiküllerinin görünümü ve farklı hızlarda Cu yüzeyine püskürtülen Al partiküllerinin yüzey etkileşimleri görülmektedir. Parçacık hızı düşük olduğu zaman partiküller yüzeye çarpıp geri dönerler orada bağlanamazlar. Bu koşullarda yapılan işlem altlık malzeme yüzeyinin erozyonundan öteye gidemez (Şekil 2.13a). Fakat bu değer kritik parçacık hızına ulaştığı veya bu değeri aştığı zaman yüzeye bağlanma başlar ve böylelikle kaplama oluşur (Şekil 2.13b ve Şekil 2.13c). Birçok deneysel çalışmalarda da saptanmıştır ki; kritik partikül hızı değeri, partikül ve kaplanacak malzemenin cinsine, partikül sıcaklığı ve boyutuna, kaplanacak malzeme yüzeyinin durumuna göre değişmektedir.



Şekil 2.13 : a-) Al partikülleri b-) 730 m/s hızla Cu yüzeyine Al partikül etkisi c-) 780 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partikül etkisi d-) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partikül etkisi [10].

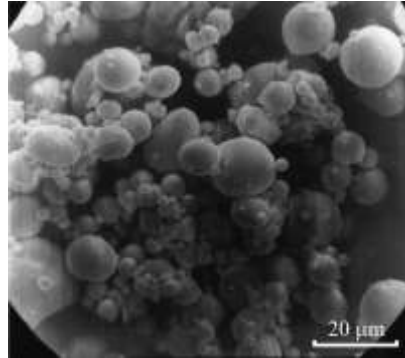
Şekil 2.14' te kaplama öncesi yüzey işleme tabi tutulan Cu altlık üzerine Al partiküllerinin kaplaması görülmektedir. Partikül hızı 850 m/s olarak ayarlandıktan sonra püskürtme yapılmıştır. Şekil 2.7.d ile kıyaslandığında partiküllerin yapışma kabiliyetinin hemen hemen %100 oranında arttığı görülmektedir. Cu altlık ağırlıkça %0.1- %20 H_2O_2 , bir inorganik asit (H_2SO_4), bir korozyon inhibitöründen (benzotrizol) oluşan bir çözelti ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Bu çalışma yapılırken H_2O_2 nin Cu yüzeyini mikro boyutta pürüzlüleştirilmesi, dolayısıyla yüzey basma mukavemetini düşürmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu çözelti ile etkileşime giren Cu yüzeyinin işlemden sonra adhezyon kabiliyeti artmıştır [10].



Şekil 2.14 : Kaplama öncesi yüze işlem görmüş Cu üzerine kaplanan Al partikülleri [10].

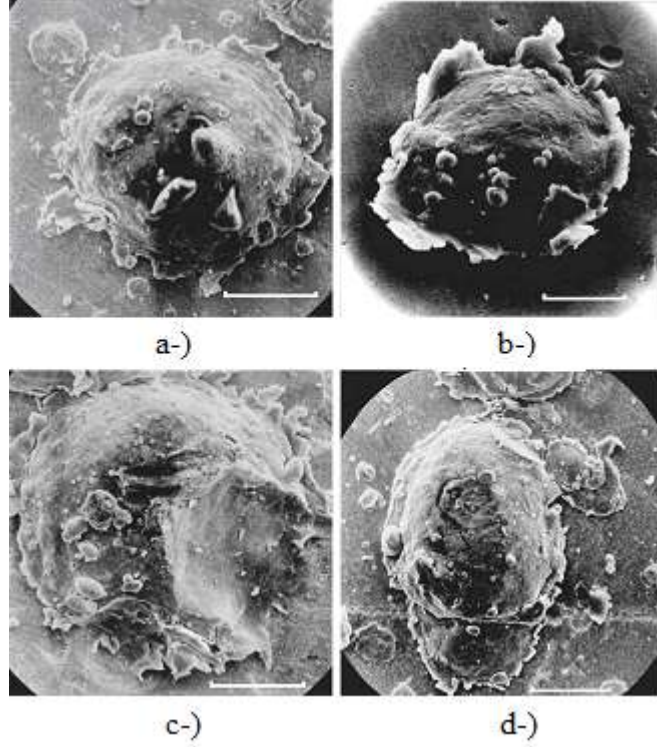
Partiküllerin kaplanacak malzeme üzerindeki deformasyonunu daha detaylı incelediğimizde karşımıza önemli parametreler çıkmaktadır. Partiküller yüzeye püskürtülürken yüzeye 90° 'lık açı ile çarparlar. Nozül ile altlık yüzeyi arası mesafe SDGP yönteminde 15-20 mm gibi bir değerde tutulur.

Şekil 2.15' de alüminyum partiküllerinin morfolojisi görülmektedir. Küresel şekilde ortalama tane boyutu $19.4 \mu\text{m}$ ' dir.



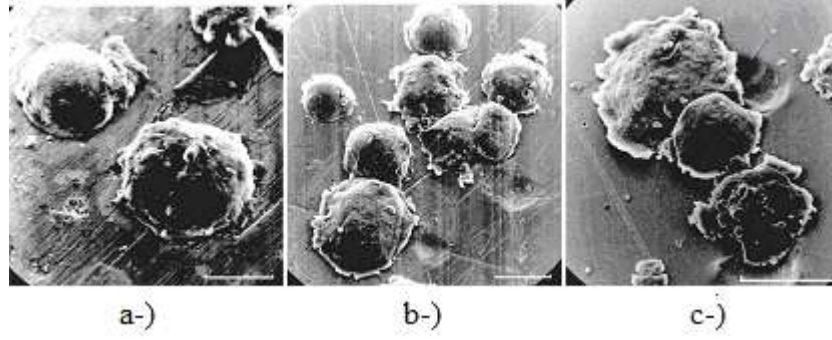
Şekil 2.15 : Al partiküllerinin morfolojisi [12].

Şekil 2.16b' de partikül yaklaşık 1100 m/s ' dir. Diğer fotoğraflara göre yüzey kalitesinin iyi olduğu açıkça belli olmaktadır. Şekil 2.16c' de partikülün şeklinde bir deformasyon görülmektedir. Yapılan incelemelerle yüzeye yapışmayıp geri seken partikül ile şekilde görülen kaplanmış partikülün çarpıştığı belirlenmiştir. Başka bir deyişle, püskürtme sırasında bu partikül seken partikül ile havada çarpışıp deformasyona uğramış ve bu şekilde yüzeye yapışmıştır. Şekil 2.16d'de ise en son kaplanan partikül kendinden bir önceki yüzeye tutunan partikül üzerine kaplanmıştır.



Şekil 2.16 : Parlatılmış Cu altlık üzerine farklı hızlarda püskürtülen Al partiküllerinin deformasyonu [12].

Şekil 2.17' te farklı hızlarda püskürtülen Al partikül deformasyonlarının mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Şekil 2.17.a ve 2.17.b' de altlık malzeme olan Cu yüzeyinin mekanik olarak aktif bir yüzey olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle kaplanmayan yüzeyde bir deformasyon görülmektedir. 730 m/s hızla püskürtülen partiküllerin oluşturduğu görüntüye (Şekil 2.17.b) bakılacak olursa, kaplanmayan parlatılmış Cu yüzeyi kalitesi 625 m/s hızla yapılan işleme göre daha iyidir. 850 m/s lik hızla püskürtüldüğünde daha pürüzsüz bir yüzey görünümü elde edilmektedir. Partikül hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Bunun nedeni düşük hızlarda püskürtülen partiküller yüzeye çarpıp yapışmadan geri sekerler. Partikül hızı arttıkça yapışma kabiliyeti arttığından seken partikül sayısı daha azdır. Yüzeyden seken partiküller yüzeye bir etki bırakmadan geri dönmezler. Yüzeye çarpıp deformasyon oluşturduktan sonra geri saçılırlar. Bu da altlık yüzeyinde bir erozyona neden olur. Hız düşük olduğunda yüzey kalitesinin kötü olması bu sonuçlarla açıklanır. İşte altlık malzemenin yüzey erozyonuna uğrayacağını mı yoksa bu malzeme üzerinde kaplama oluşacağını mı belirleyen bu faktör partikül kritik hızıdır. Belli bir değerden sonra artık yüzey erozyona uğramaz gelen partiküller geri saçılmadan yüzeye tutunur ve kaplama oluşur [12-15].



Şekil 2.17 : Yüzeyi parlatılmış Cu altlık üzerine farklı hızlarda püskürtülen Al partiküllerinin deformasyonu a-) 625 m/s, b-) 730 m/s, c-) 850 m/s [12].

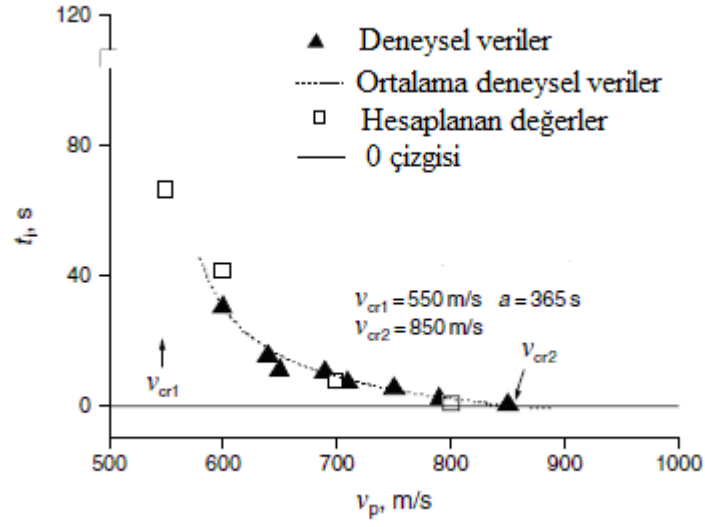
Çok ince tabakalı kaplamalar haricindeki püskürtme kaplamalar iki aşamada oluşur. Birinci aşama ilk partiküllerin püskürtüldüğü ve altlık ile partiküllerin ilk etkileşiminin olduğu aşamadır. Kaplama yapışma ve arayüzey kalitesi bu aşamada belirlenir. İkinci aşama ise kaplama filminin kalınlaştığı aşamadır. Yapışmayı arttırmak için özellikle termal spreyci yönteminde kaplama öncesi numuneye genellikle kum püskürtme işlemi uygulanır. Bu işlemle partiküllerin altlık malzeme yüzeyine yapışma kabiliyeti artırılmaktadır. Fakat kum püskürtme işleminin dezavantajları da vardır. En önemli dezavantajı özellikle yumuşak malzemeden oluşan altlıklarda kum tanelerinin malzemenin içerisine penetre olması ve böylelikle arayüzeyin yabancı maddelerce kirlenmesine neden olmasıdır. Kum püskürtme işlemi her malzemeye uygulanamaz. Özellikle ince et kalınlığına sahip malzemelere, önceden kaplanmış parçalara, kırılabilirliği yüksek gevrek malzemelere kum püskürtme işlemi uygulanamaz. SDGP yönteminde partiküller zaten katı haldedir. Düşük hızlarda partikül püskürtme işlemlerinde yüzey erozyonundan bahsedilmiştir (Şekil 2.13.a). İşte bu yüzey erozyonundan dolayı SDGP işlemi bazı durumlarda özellikle kum püskürtme işleminin uygun olmadığı durumlarda altlık malzemeyi kaplama öncesi hazırlamak için kullanılır.

Yapılan çalışmalarda yüzeyin püskürtülen partiküllerle aktivasyonu ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada indüksiyon zamanı denilen önemli bir parametre göze çarpmaktadır. Özellikle düşük hızlarda altlık malzeme üzerine partiküller püskürtüldüğünde o an kaplama oluşmaz. Kaplama oluşmadan bahsi geçen yüzey hazırlama evresi başlar. Bu evrede partiküller geri sekerler ve bir erozyon oluşturarak yüzeyi hazırlar. Yüzey mekanik olarak aktif hale geldiği zaman partiküller yapışmaya başlar ve kaplama oluşur. İşte bu iki evre arasındaki yüzey hazırlama için

geçen gecikme zamanına indüksiyon zamanı denir. Bu inceleme matematiksel olarak modellendiğinde iki önemli parametre ortaya çıkmaktadır. v_{cr1} ve v_{cr2} . Deneysel çalışmalar [16] sırasında bu kritik hızlar $v_{cr1}= 550$ m/s, $v_{cr2}= 850$ m/s olarak belirlenmiştir. İndüksiyon zamanını kategorize ederken bu iki kritik hız değerinin ayırdığı üç bölge tanımlanır.

$$3.bölge < v_{cr1} < 2.bölge < v_{cr2} < 1.bölge \quad (2.1)$$

550 m/s hızdan daha düşük hızlarda yapılan püskürtmelerde kaplama oluşmamaktadır. Bu hızda yalnızca yüzey erozyonu oluşur ve kaplama oluşma anı gelmeden sadece indüksiyon zamanı vardır. 2. bölge optimum bölgedir. Gelen partiküller orijinal yüzeye yapışamazlar. Bir indüksiyon zamanı mevcuttur bu zaman hız arttıkça azalır. İndüksiyon zamanı sonrası kaplama oluşur. Bu zaman diliminde yüzeye gelen partiküller geri sekerler ve yüzeyi kaplama öncesi hazırlarlar. Yüzeye ilk gelen bu partiküller yüzeydeki dislokasyon yoğunluğunu artırır. Yüzeyden seken partikül miktarı ile daha sonra kaplanacak olan partikül miktarı yaklaşık olarak eşittir. Bu da aktivasyon enerjisinin partikülün kendi enerji değerine yaklaşmasına sebep olur. Kısaca partikül-altlık aktivasyon enerjisi düşer. Böylelikle onu takip eden partiküller için kaplama koşulları sağlanmış olur ve bu partiküller yüzeye yapışarak kaplamayı oluştururlar. Partikül hızının düşmesiyle indüksiyon zamanının artmasının nedeni daha yoğun yüzey hazırlamanın ve yüzey aktivasyonun gerekli olmasıdır. 3. bölgede ise hiçbir şekilde gecikme olmadan partiküller yüzeye yapışmaktadırlar. Bu yüzden de herhangi bir yüzey hazırlama veya yüzey erozyonundan bahsedilemez.



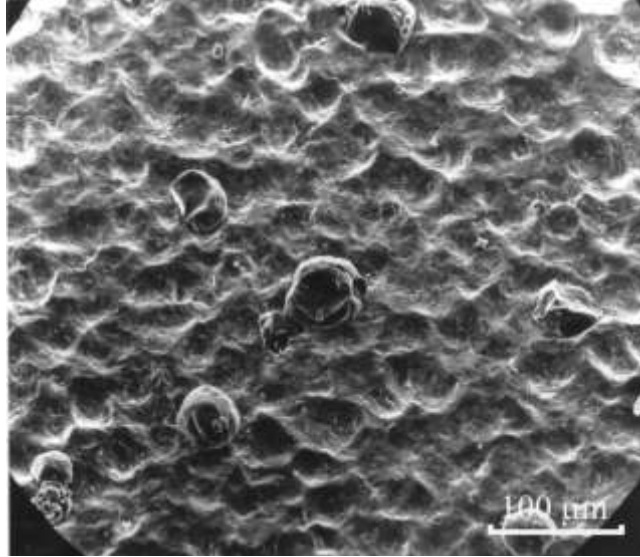
Şekil 2.18 : Partikül hızı-indüksiyon zamanı grafiği [17].

İndüksiyon zamanı ;

$$t_i = a \left(\frac{1}{\sqrt{v_p - v_{cr1}}} - \frac{1}{\sqrt{v_{cr2} - v_{cr1}}} \right) \quad (2.2)$$

ile hesaplanır. t_i , gecikme zamanı, v_p , partikül püskürtme hızı, a sabit (365 s) v_{cr1} ve v_{cr2} kritik partikül hız değerleridir.

Şekil 2.19 ' da 600 m/s partikül hızında püskürtülen partiküllerin yüzeyde gösterdiği etki görülmektedir.



Şekil 2.19 : Kaplama öncesi seken partiküllerin hazırladığı yüzeyin mikroyapı fotoğrafı [17].

600 m/s hız ile yapılan işlemde indüksiyon zamanı hesaplanırsa;

$$t_i = a \left(\frac{1}{\sqrt{v_p - v_{cr1}}} - \frac{1}{\sqrt{v_{cr2} - v_{cr1}}} \right) = 365 \left(\frac{1}{\sqrt{600 - 550}} - \frac{1}{\sqrt{850 - 600}} \right) = 28 \text{ s.}$$

bulunur. Şekil 2.19’ da erozyon sonrası partiküllerin yapışmaya başladığı görülmektedir. Bu demek oluyor ki Şekil 2.19’ daki görüntü 28-29 s. püskürtme yapıldıktan sonra alınmıştır. Bu indüksiyon zamanı içinde partiküller yüzeyde deformasyon oluşturarak yüzey-partikül aktivasyon enerjisini düşürmüş ve kaplamaya hazır hale getirmiştir.

İndüksiyon zamanı yalnızca partikül hızına bağlı değildir. Kaplama jeti içerisindeki partikül konsantrasyonu da bu zamanı etkileyen önemli bir faktördür [16-17].

2.3 SDGP İle İlgili Örnek Çalışmalar

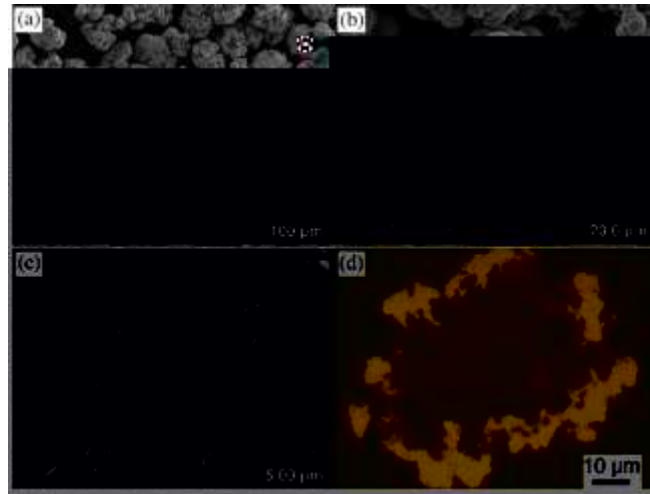
2.3.1 Ni kaplı Al_2O_3 kompozit kaplamaların SDGP yöntemi ile üretilmesi

Bu çalışmada [18] Ni kaplı Al_2O_3 partikülleri SDGP yöntemi ile düşük karbonlu çelik altlık üzerine kaplanmış ve karakterize edilmiştir.

Şekil 2.20’de Ni kaplı Al_2O_3 partikülleri görülmektedir (-80+300 meş arası) [19]. Al_2O_3 partiküllerinin hacimce oranı % 40-45’ dir.

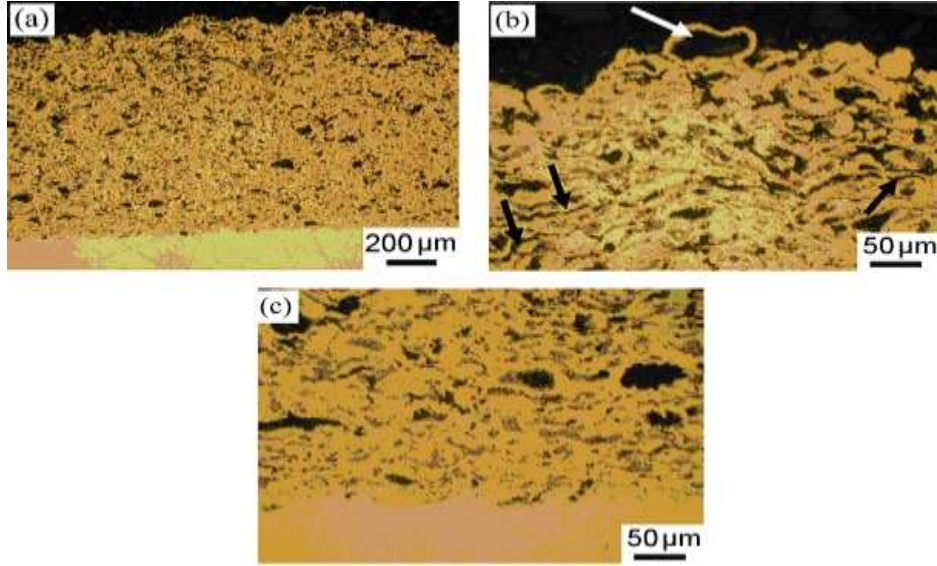
Bu partiküllerin etrafındaki Ni kaplamanın kalınlığı ise 10-20 μm dir. Bu çeşit bir toz genelde 800 $^{\circ}C$ ’ nin altındaki sıcaklıklarda korozyon ve aşınma direncini artırma amaçlı plazma sprey uygulamalarında kullanılmaktadır.

Düşük karbonlu çelik altlık malzeme olarak seçilmiş ve kaplama öncesi Al_2O_3 kullanılarak kum püskürtme işlemine tabi tutulmuştur. Kullanılan gaz basıncı 2.7 MPa sıcaklığı ise 495 $^{\circ}C$ ’ dir. Püskürtme sırasında nozülün altlıktan uzaklığı 30 mm olarak tutulmuştur.



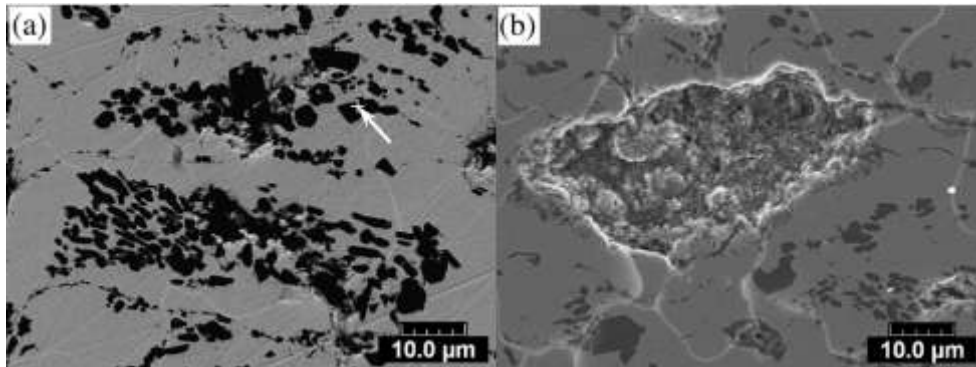
Şekil 2.20 : a-) Kaplamada kullanılan Ni kaplı Al_2O_3 partiküllerin SEM görüntüleri. b-) Ni kaplı Al_2O_3 partikül. c-) Daha büyük büyütmede partikül d-) Partikülün kesit alanından alınan OM görüntüsü.

5 pasoda kaplanan Ni-Al₂O₃ kompozit tabaka Şekil 2.21'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 2.21b'de beyaz ok ile gösterilen boşluklu yapı metallografik inceleme için numune hazırlama sırasında çok küçük boyutlu bağ kuvveti zayıf Al₂O₃ partiküllerinin kopmasından dolayı oluşmaktadır. Siyah ok ile gösterilen kısım katmanlar arası çatlaklardır. Bu çatlaklar da kaplamanın 5 ayrı pasoda oluşturulmasından doğmaktadır.



Şekil 2.21 : Ni-Al₂O₃ kompozit kaplamanın optik mikroskop görüntüleri

Püskürtmeden sonra kaplanmış tabaka içerisindeki tozun taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (Şekil 2.22) elde edilmiş ve Şekil 2.22.a' da beyaz ok ile belirtilen kısımdan EDS alınmıştır (Çizelge 2.2). Buna göre siyah noktaların Al₂O₃ olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.22.b' de Al₂O₃ partiküllerinin Ni matris içerisinde iyi bağlandığı görülmektedir.

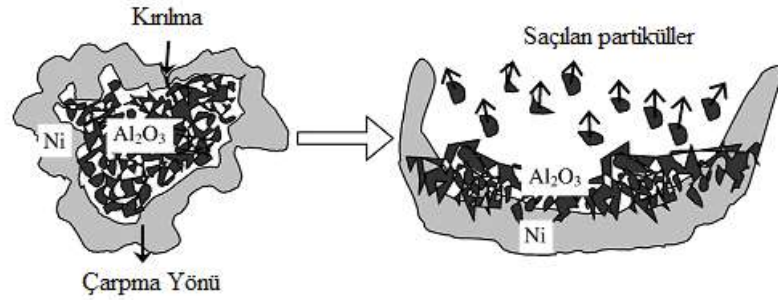


Şekil 2.22 : Ni-Al₂O₃ kompozit kaplamanın SEM görüntüleri a-) Geri saçılan elektronlar ile elde edilen görüntü. b-) İkincil elektronlar ile elde edilen görüntü.

Çizelge 2.2 : Şekil 2.29a’ da beyaz ok ile belirtilen kısımdan alınan EDS sonuçları.

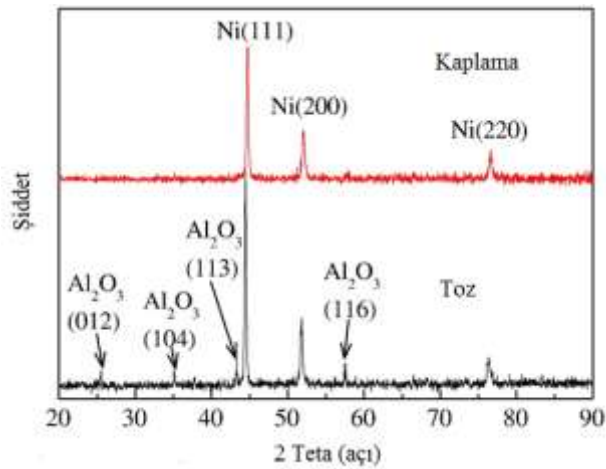
Element	O	Al	Ni	Toplam
% ağı.	41.59	40.67	17.74	100.00

Bazı geniş boşluklar oluşmasının sebebi püskürtme esnasında Ni kaplı tabakada çatlakların oluşarak bu yapı içerisinde zayıf bağ mukavemetli Al_2O_3 partiküllerin yapıdan ayrılmasıdır (Şekil 2.23). Yapılan analizlere göre püskürtme öncesi Al_2O_3 hacimce oranı % 40-45 civarı iken kaplama sonrası bu oran % 29’ lara düşmüştür.



Şekil 2.23 : Yapıya dahil olan ve yapıdan ayrılan Al_2O_3 partiküllerinin şematik gösterimi.

X-ışını difraksiyon analizine göre (Şekil 2.24) toz incelemesinde Al_2O_3 piklerini görebiliyoruz. Yalnız kaplama içerisinde bu pikler kaybolmaktadır. Bunun sebebi X-ışını difraksiyonu sırasında Ni matrisin Al_2O_3 partikülleri ışınların gelme açısında sarmış olmasıdır. Dikkatle bakılırsa Ni piklerinde yaklaşık 0.3° ‘lık bir kayma oluşmuştur. Bu ise kaplama yüzeyindeki aşırı plastik deformasyondan oluşan latis distorsiyonu ile açıklanabilir.



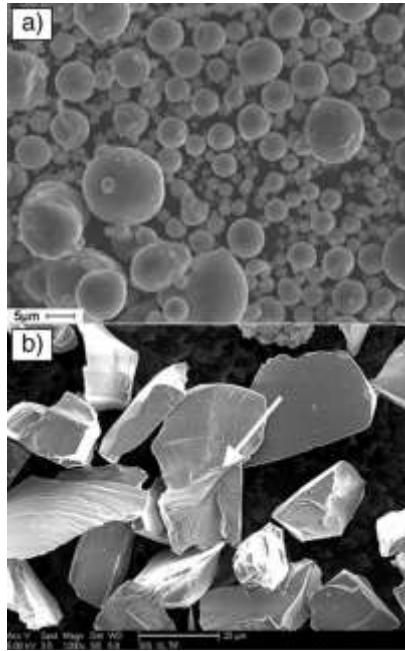
Şekil 2.24 : Ni-Al toz ve kaplama XRD sonuçları.

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde; oluşan kompozit tabakanın aşınma direncini arttırdığı, sertlik ölçümlerinde 173 ± 33 Hv_{0.2} sertliğe sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. İnce taneli Al₂O₃ partiküllerin düzgün dağılımı ve matris içerisine yüksek bağ mukavemeti ile bağlı olmaları sebebi sertlik yüksek çıkmıştır.

2.3.2 SDGP ile Al-12Si matrisli SiC partikül takviyeli kompozit üretimi

Bu çalışmada [20], SDGP tekniği ile Al-12Si matrisli SiC takviyeli kompozit kaplama üretilmiş ve ardından özellikleri araştırılmıştır.

Şekil 2.25.a'da Al-12Si toz alaşımının mikroyapısı görülmektedir. Bu küresel toz partiküllerinin çapı 5-45 µm arasında değişmektedir. Şekil 2.25.b'de ise keskin köşeli SiC partikülleri görülmektedir. SiC partiküllerinin yoğunluğu (3.2 g/cm³) Al-12Si yoğunluğundan (2.7 g/cm³) nispeten fazla olmasına rağmen keskin köşeli partiküllerin küresel partiküllere göre daha hızlı püskürtülme kabiliyetinden dolayı parçacık hızları aşağı yukarı eşittir.

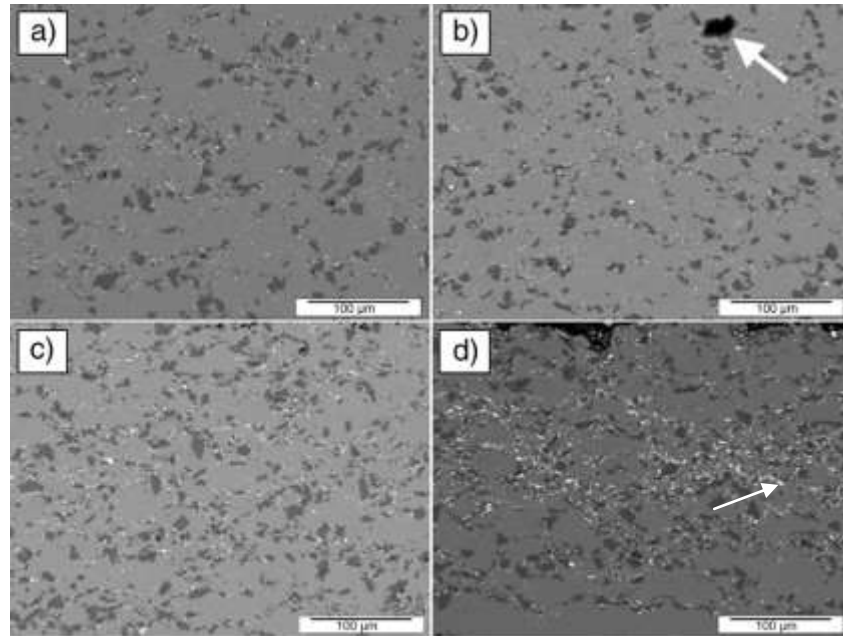


Şekil 2.25 : a-) Al-12Si morfolojisi, b-) SiC morfolojisi

Kaplama işlemi sırasında yakınsak-ıraksak nozül kullanılmış çıkış ucunun çapı 7.3 mm.'dir. Helyum taşıyıcı gaz olarak kullanılmış ve gaz basıncı 1.7 MPa ve gaz sıcaklığı 360°C olarak ayarlanmıştır. 6061-T6 altlık malzemesi olarak kullanılmış ve yüzeyine kaplama öncesi kumlama işlemi yapılmıştır.

Kumlama işlemi 45° açılarla 400 kPa basınçta ferro silikat parçacık kullanılarak yapılmıştır. Nozülün altlık malzemeden uzaklığı 10 mm olarak ayarlanmıştır.

SiC tane boyutu 32µm nin altındadır. Hacimce %20, %30, %40 ve %60 SiC kompozisyonlarına sahip kompozit kaplamalarda mikroyapıdaki beyaz noktalar yüksek hızda püskürtme işleminden kaynaklanan nozülden kopan parçacıklardır (Şekil 2.26.d). EDS sonuçlarında bu noktaların paslanmaz çelik olduğu saptanmıştır ve bu parçacıkların nozülün aşınması sonucu yapıya dahil olduğu belirlenmiştir. SiC miktarı arttıkça tabanca içerisindeki aşınmanın arttığı mikroyapı incelemeleri sonucu anlaşılmıştır. Beyaz ok ile gösterilen kısım ise SiC partikülünün numune hazırlama işlemi sırasında yapıdan ayrılması sonucu oluşan boşluktur (Şekil 2.26.b).

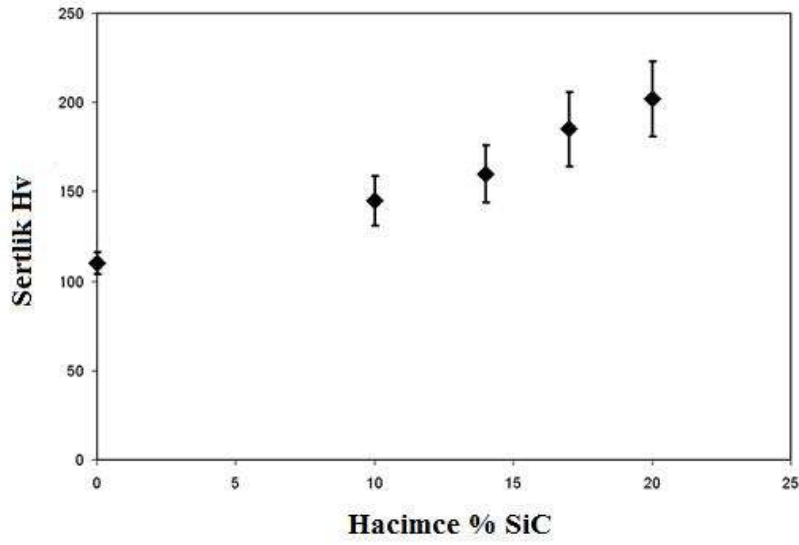


Şekil 2.26 : Hacimce a-) %20 SiC, b-) %30 SiC, c-) %40 SiC, d-) %50 SiC içeren Al-12Si-SiC kompozit kaplamaların kesit alanlarından alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

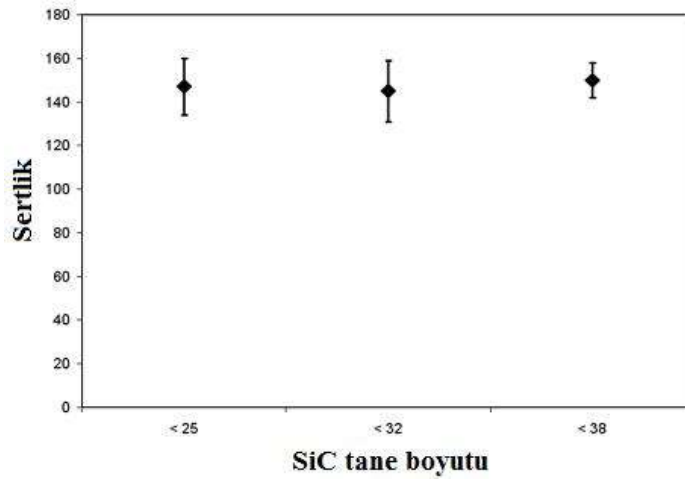
Yapılan karakterizasyon çalışmalarında porozitenin %1 in altında olduğu, arayüzeyin mükemmel plastik deformasyon kabiliyetinden dolayı kusursuz olduğu gözlenmiştir. SiC partiküllerin püskürtme öncesi fiziksel morfolojisi kaplama içerisinde de aynıdır.

Al-12Si matris içerisindeki SiC karbür miktarı arttıkça sertliğin arttığı görülmektedir (Şekil 2.27). Sertlik değerleri %10 ve %20 SiC içeren kaplamalarda sırasıyla 145±14 ve 205±25 HV_{300g} değerlerindedir. SiC takviyesi olmadan yalnızca Al-12Si

matrisin sertliği 110 ± 25 HV_{300g} değerindedir. Bu demek oluyor ki %10 SiC takviyesiyle %32, %20 SiC takviyesiyle %86'lık bir sertlik artışı olmaktadır



Şekil 2.27 : Sertlik-SiC kompozisyon grafiği



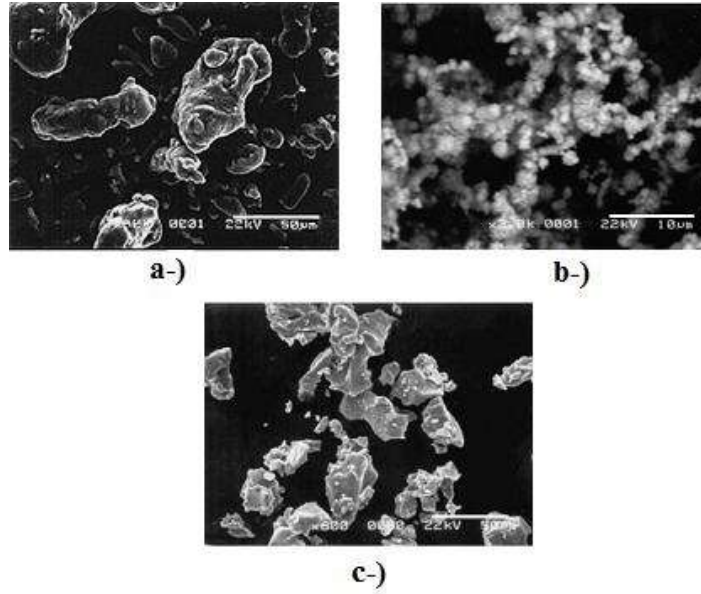
Şekil 2.28 : SiC tane boyutu- Sertlik grafiği.

Yapılan incelemelere göre sertliğin SiC tane boyutuyla çok fazla ilgili olmadığı görölmektedir (Şekil 2.28).

2.3.3 SDGP ile üretilen Al-Ni ve Al-Ti kompozit kaplamalara uygulanan ısıtım işlem sonrası metallere arası bileşiklerin elde edilmesi

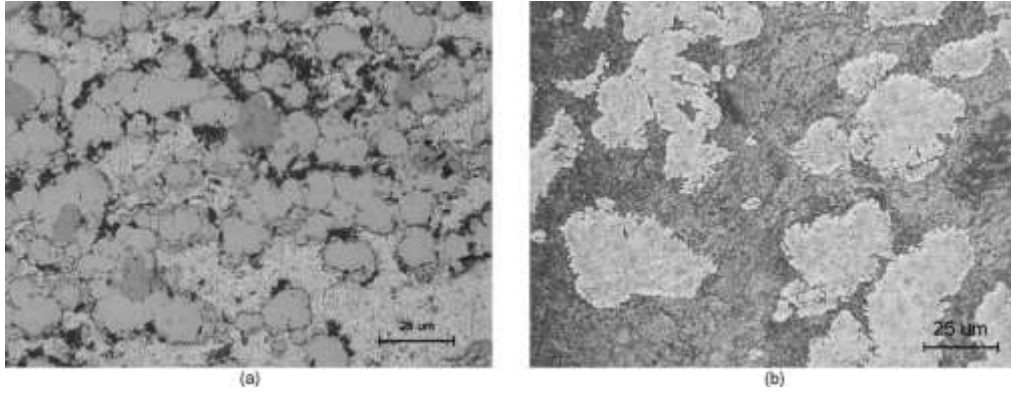
Bu çalışmada [21], SDGP yöntemiyle elde edilen kaplama sonrası kaplamalara ısıtım işlem uygulanarak intermetalik bileşik oluşturmak hedeflenmiştir.

Al tozları (Şekil 2.29.a) düzensiz morfolojide ortalama 77 µm tane boyutunda, Ti partikülleri ortalama 43 µm tane boyutunda dikdörtgen geometride, Ni partikülleri ise 3 µm tane boyutunda aglomere yapıdadırlar.



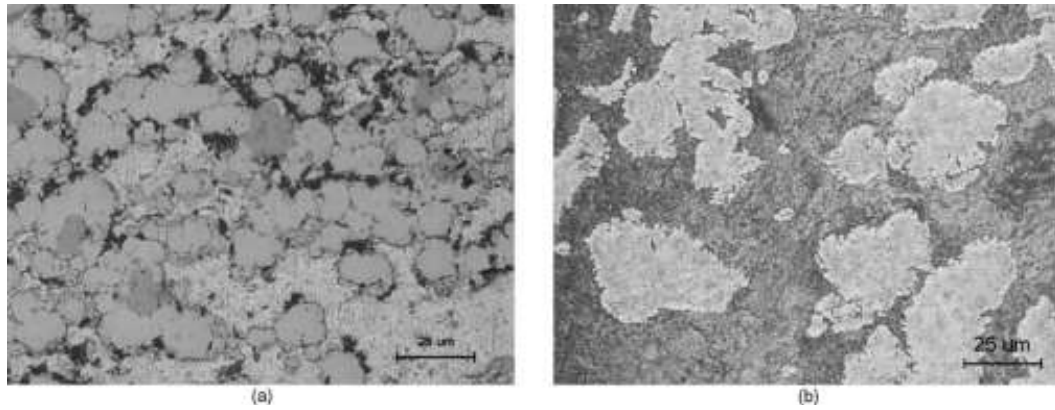
Şekil 2.29 : a-) Al b-) Ni c-) Ti partiküllerinin taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Ni partikülleri kaplama sonrası orijinal morfolojilerini kompozit kaplama içerisinde de göstermektedirler (Şekil 2.30.a). Fakat Ti partiküllerine baktığımızda kaplama içerisinde orijinal morfolojilerine kıyasla daha küçük tanelere rastlanmaktadır. Bunun sebebi Ti partiküllerinin daha yüksek parçacık hızına ulaşması ve buna bağlı olarak altlık malzeme ile ve birbirleriyle olan çarpışmaları sonucu Ti partiküllerinin kırılması ve tane boyutunun küçülerek yapıya dahil olmalarıdır.



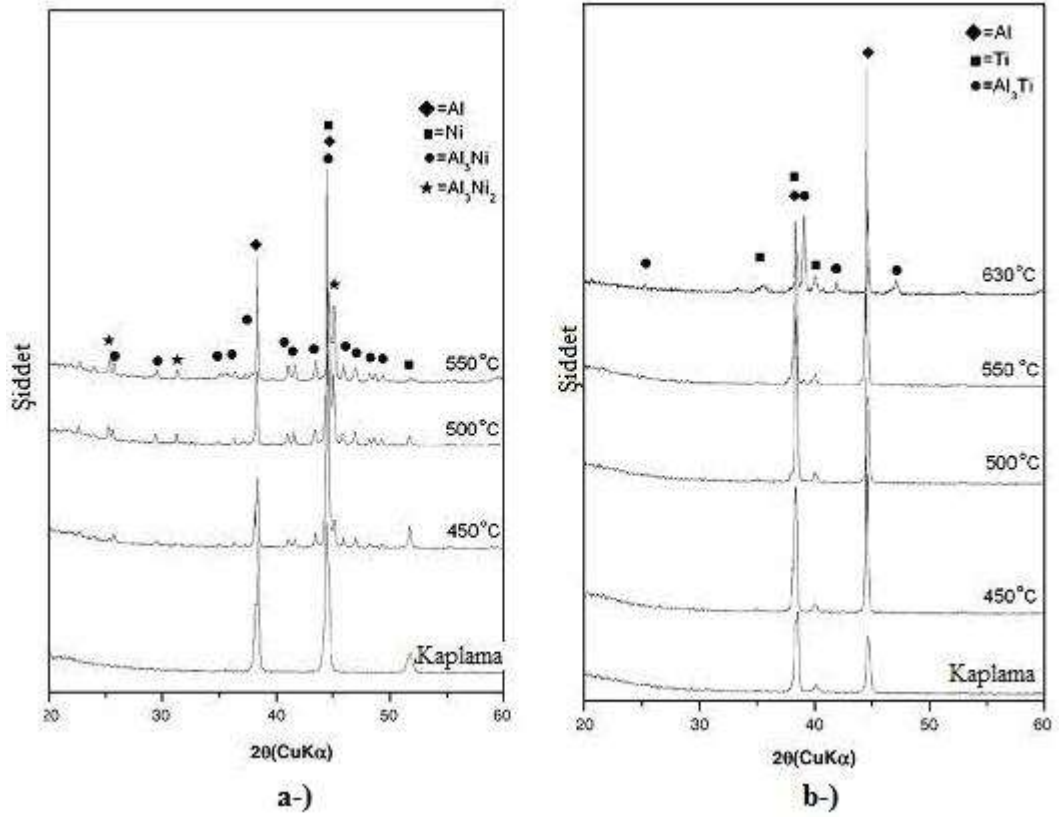
Şekil 2.30 : a-) Al-Ni, 500X, b-) Al-Ti, 500X parlatılmış optik mikroskop görüntüleri.

Al-Ni (Şekil 2.31.a) ve Al-Ti (Şekil 2.31.b) kompozit kaplamaların ısıtılma sonrası optik mikroskop fotoğrafları yer almaktadır. Al-Ni kompozit kaplamaları 500°C de Al-Ti kaplaması ise 630°C’de ısıtılma tabi tutulmuş ve yeni fazların oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 2.31.a’ ya bakıldığında Ni partiküllerinin ısıtılma sonrası Al-Ni arası reaksiyon sebebiyle büyüdüğü ve yeni fazların oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.31 : a-) 500 °C’ de ısıtılma görmüş, x500 Al-Ni b-) 630 °C’ de ısıtılma görmüş Al-Ti, x500 kompozit kaplamaların kesit alanından alınan optik mikroskop görüntüleri.

Benzer biçimde Al-Ti arası reaksiyon sonucu Al-Ti kompozit kaplama içerisinde yeni bir fazın oluştuğu belirlenmiştir. Bunu daha iyi ortaya koymak adına ısıtılma sonrası X-ışınları difraksiyon analiz sonuçları Şekil 2.32’ de görülmektedir.

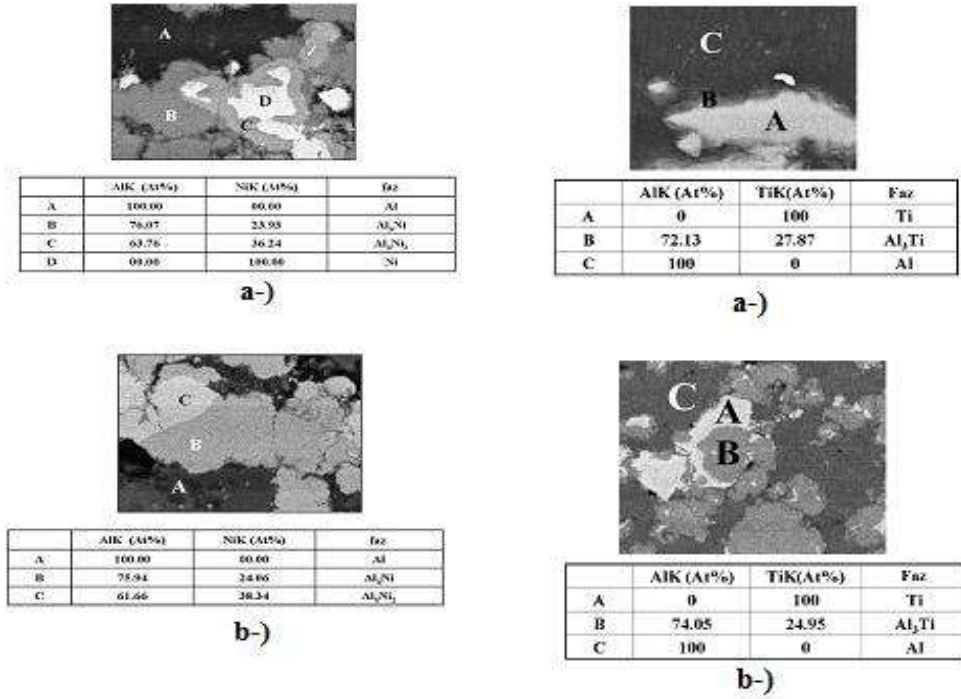


Şekil 2.32 : a-) Al-Ni b-) Al-Ti kompozit kaplamaların ısıtıl işlem sonrası ve öncesi X-ışını difraksiyon analiz sonuçları.

X-ışını difraksiyon analizi paternlerine bakacak olursak ısıtıl işlem öncesi kaplamalarda Ni pikleri gözükmemektedir fakat ısıtıl işlem sıcaklığı arttıkça Ni pikleri Al-Ni reaksiyonundan dolayı azalmaktadır ve 450 °C' de Al_3Ni ve Al_3Ni_2 pikleri ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde Al-Ti kompozit kaplamasında da 550 °C' de Al_3Ti metallerarası bileşiği piki ortaya çıkmaktadır ve artan sıcaklıkla daha da belirgin hale gelmektedir. Optik mikroskop görüntüleri ve X-ışını incelemeleri, kaplama içerisindeki Ni ve Ti partikülleri matris içinde Al ile sıcaklığın etkisiyle reaksiyona girdiğini ve böylelikle metallerarası bileşiklerin oluştuğunu göstermektedir.

Isıl işlem sonrası EDS sonuçlarına göre 450 °C ve 550 °C' de Al-Ni kompozit kaplamasında oluşan fazlar görülmektedir (Şekil 2.33). 450 °C' de Ni yapıda bulunmakta iken 550 °C' de Ni tamamen tükenmiş metallerarası bileşiklerin kompozisyonu artmıştır.

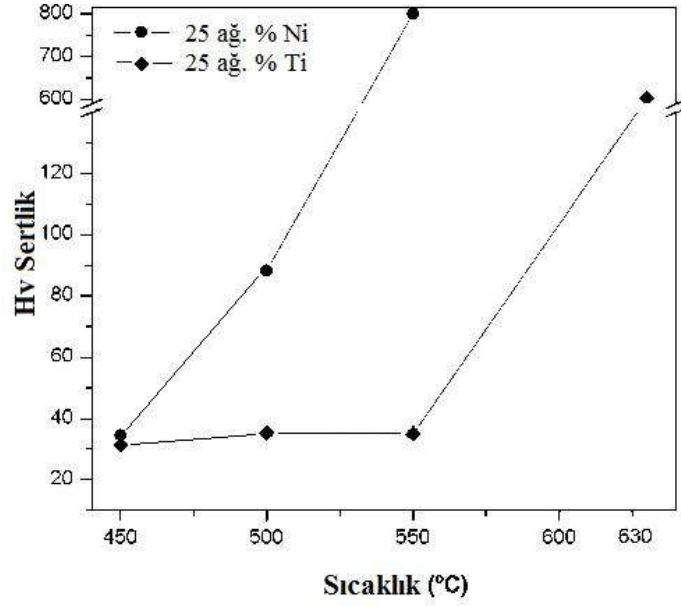
Benzer şekilde Al-Ti kaplamasına bakıldığında 450 °C’ de tane sınırlarında Al_3Ti metallerarası bileşiğinin olduğu (Şekil 2.34) 630 °C’ de Ti partikülleri yoğun bir şekilde matris içinde Al ile reaksiyona girmekte ve Al matris içerisinde Al_3Ti metallerarası bileşiğinin yayıldığı görülmektedir.



Şekil 2.33 : a-) 450 °C b-) 550 °C’ de ısıtılmış Al-Ni kaplamanın EDS analizi.

Şekil 2.34 : a-) 450 °C ‘de b-) 630 °C’ de ısıtılmış Al-Ti kaplamanın EDS analizi.

Al-Ni kompozit kaplamalarda ısıtılma sıcaklığı arttıkça metallerarası bileşiklerin (Al_3Ni , Al_3Ni_2) kompozisyon miktarları artmaktadır. Böylece sıcaklık artışıyla sertlik de artmıştır (Şekil 2.35). Yalnız Al-Ti kompozit kaplamasında 550 °C’ de Al-Ti arası kimyasal reaksiyonun gerçekleşmemesinden dolayı 550 °C sıcaklıkta belirgin bir sertlik artışı gözlenmemektedir. 630 °C’ de ise Al-Ti arası reaksiyon gerçekleşmektedir ve Al_3Ti metallerarası bileşiği yapıda olduğundan ani bir sertlik artışının olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.35 : Al-Ni, Al-Ti kompozit kaplamaların sertlik-sıcaklık grafiği.

2.3.4 Al-12Si SDGP ile kaplanması ve karakterizasyonu

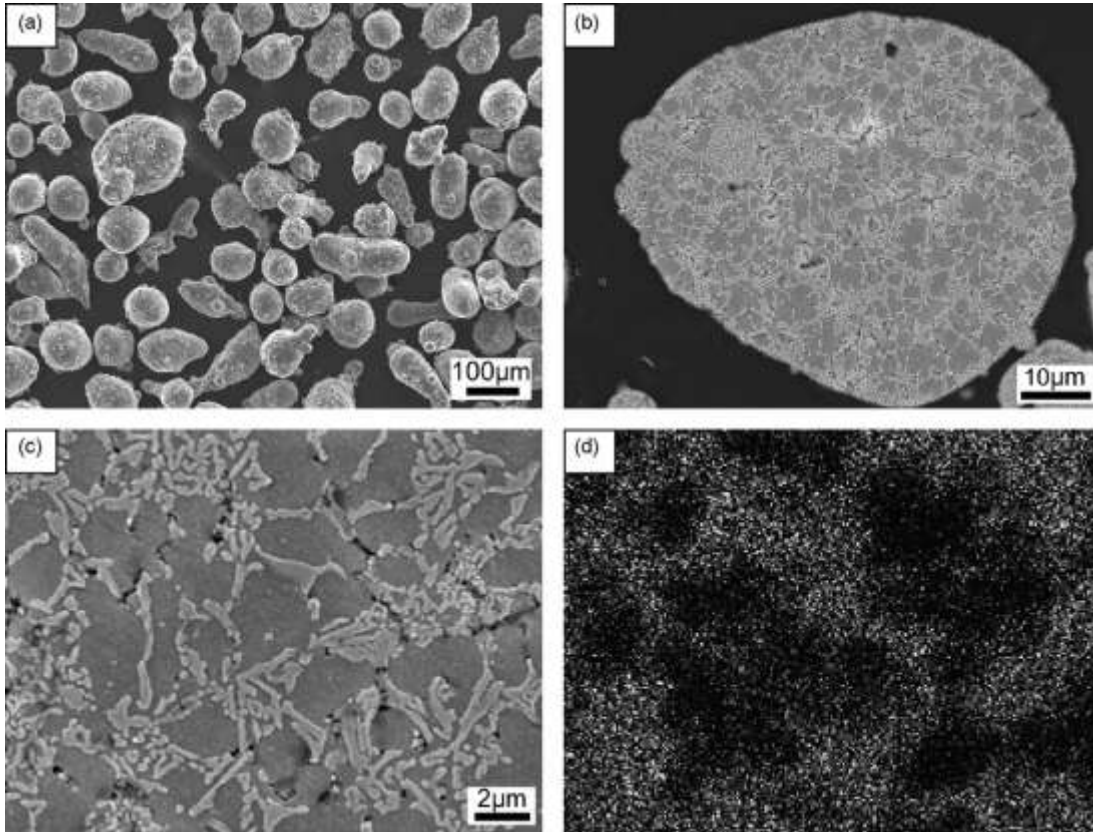
Bu çalışmada [22], Al-12 Si tozu SDGP ile kaplanmış ve karakterize edilmiştir.

Yüksek basınçlı hava ve toz taşıyıcı gaz olarak argon gazı kullanılmıştır. Hava basıncı 2.7 MPa ve sıcaklık 400-560 °C olarak ayarlanmıştır. Kaplama işlemi sırasında nozülün altlık yüzeyinden uzaklığı 30 mm.' dir. Al-12Si tozu Sulzer-Metco tarafından üretilmiş olup tane boyutu +45-90 μm aralığındadır. Nozülden püskürtülen taneciklerin numune yüzeyinden çarpmasına bağlı olarak izafi hızı 160 m/s olarak ölçülmüştür.

Kaplamanın mikroyapısı; optik mikroskop ,taramalı elektron mikroskobu, EDS ve Cu $K\alpha$ radyasyonlu X-ışını difraksiyon analizi ile incelenmiştir. Daha iyi bir mikroyapı analizi için bazı parlatılan numuneler 100 ml H_2O + 3ml HF +6ml HNO_3 çözeltisiyle dağlanmıştır. Mikrosertlik Vickers sertlik deneyi ile 50 gr. yük altında 15 sn. süreli sertlik ölçümü yapılmıştır.

Kaplamanın özelliklerini daha iyi anlamak için, püskürtme koşullarındaki parçacıkların hızı 2D asimetrik model olan ticari FLUENT yazılımı ile hesaplanmıştır. Bu simulasyon metodu ile yapılan hesaplamayla SDGP içinde parçacıkların hız davranışı doğru bir şekilde dedekte edilerek deney şartlarındaki verilerle örtüşmüştür.

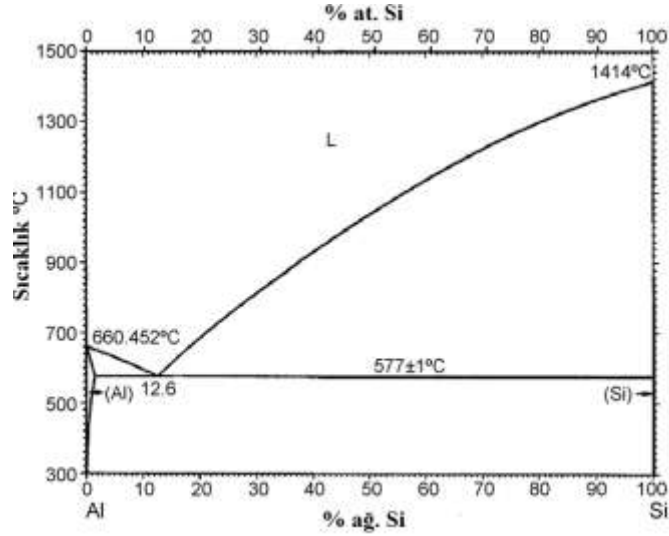
Al-12Si tozu küresel morfolojide (Şekil 2.36.a), α -Al dendritik yapı içerisinde şekillenmiş Si fazı içermektedir (Şekil 2.36.c).



Şekil 2.36 : a-)Al-12Si toz morfolojisi b-) Partikül kesit alanı c-) Yüksek büyütme d-) Si elementinin EDS analizi.

Faz diyagramına bakıldığında (Şekil 2.37) Al-12Si kompozisyonunun Al-Si %12.6 ötektik bileşimine çok yakın olduğu görülmektedir. EDS sonuçlarına göre (Şekil 2.36.d) koyu gri faz (Şekil 2.36.c) alüminyumca zengin, açık gri faz silisyumca zengindir. α -Al ve Si pikleri (Şekil 2.38) görülmektedir.

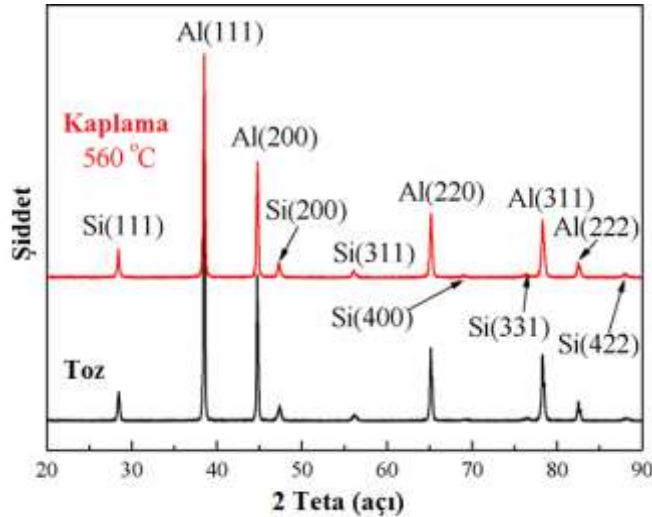
Böyle bir mikroyapıdan ve silisyumun düşük süneklik özelliğinden dolayı Al-12Si alaşımı saf alüminyuma göre daha az sünek fakat daha fazla mukavemete sahiptir. Bu tozun mikrosertliği 64 ± 8 Hv_{0,05} olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.37 : Al-Si Faz Diyagramı.

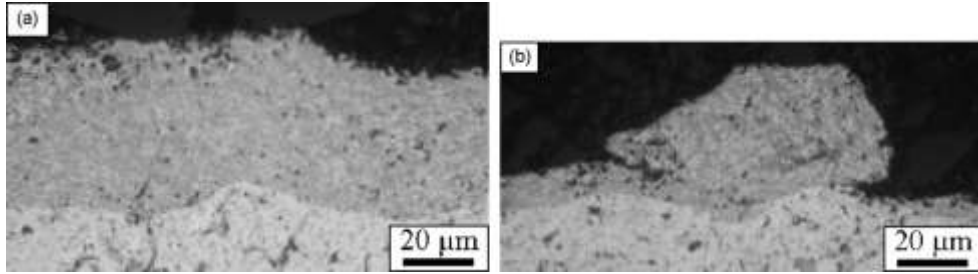
64±8 Hv_{0,05} olan Al-12Si tozunun sertliği 560 °C’ de yapılan kaplama ile kıyaslandığında 99±12 Hv_{0,05} gibi önemli bir artış göstermektedir. Her ne kadar deformasyon sertleşmesi etkisi kaplamanın sertliğinin artmasında rol oynayabilse de sertliğin artışıdaki asıl sebep Si partiküllerinin kaplama içinde disperse olmasıdır.

XRD analizinden kaplamanın toz ile aynı kristal yapıya sahip olduğu görülüyor. Buna ek olarak tozun oksijen içeriğinin % ağı. 0,016 kaplamanın ise % ağı. 0.036 olduğu hesaplanmıştır. Bu veriler kaplama sırasında hiçbir şekilde faz değişiminin, difüzyonun ve oksidasyonun gerçekleşmediğini göstermektedir.

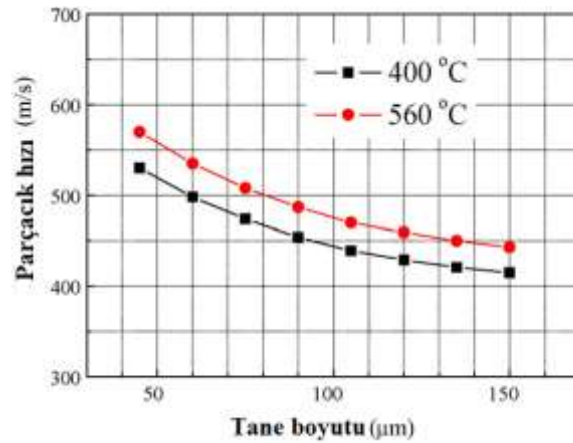


Şekil 2.38 : Kaplama öncesi ve sonrası Al-12Si X-ışını difraksiyon analizi.

Literatür çalışmalarına göre [23-24], Al-12Si kaplaması azotun taşıyıcı gaz olarak kullanılmasıyla 300-400 °C sıcaklıkta ince taneli (-45µm) Al-12Si tozu püskürtülerek oluşturulabilmektedir. Yalnız oluşturulan Al-12Si kaplamaların poröz yapıda olduğu ve artan gaz sıcaklığıyla kaplama porozitesinin arttığı gözlenmiştir. Örneğin 410 °C’ de yapılan kaplamanın porozitesi %7.3 civarındadır. Yine de, kaplama kalınlığı artan gaz sıcaklığıyla artış göstermiştir. Bu da yüksek sıcaklıklarda yüksek kaplama verimliliği anlamına gelmektedir. Bu yüzden yapılan deneyde göreceli olarak iri taneli parçacıklar kullanılmış ve gaz sıcaklığı 400 °C olarak belirlenmiştir. Fakat püskürtme deneyinde 400 °C gaz sıcaklığında çok ince bir kaplama oluşmuştur (Şekil 2.39a). Bu, parçacıkların kaplanması için gereken kritik hıza çoğu parçacık için ulaşamadığı anlamına gelmektedir.

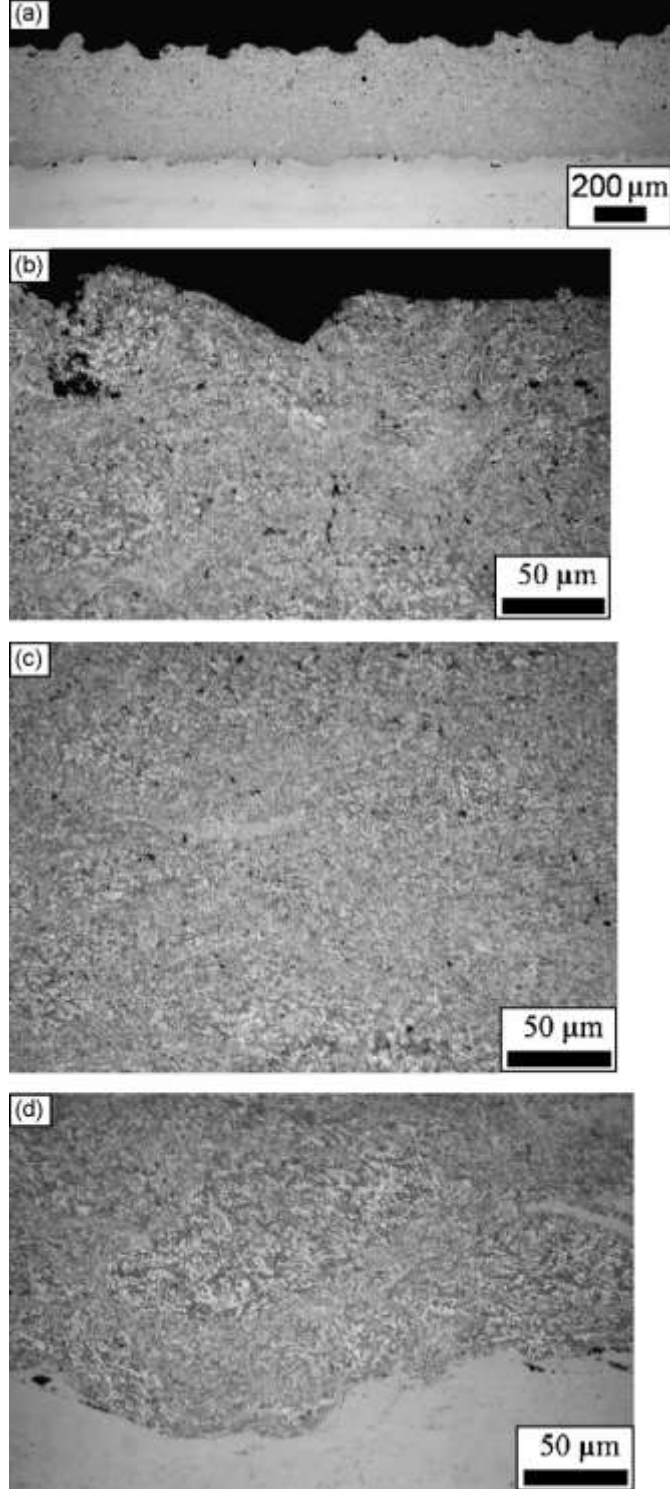


Şekil 2.39 : 400 °C’de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri



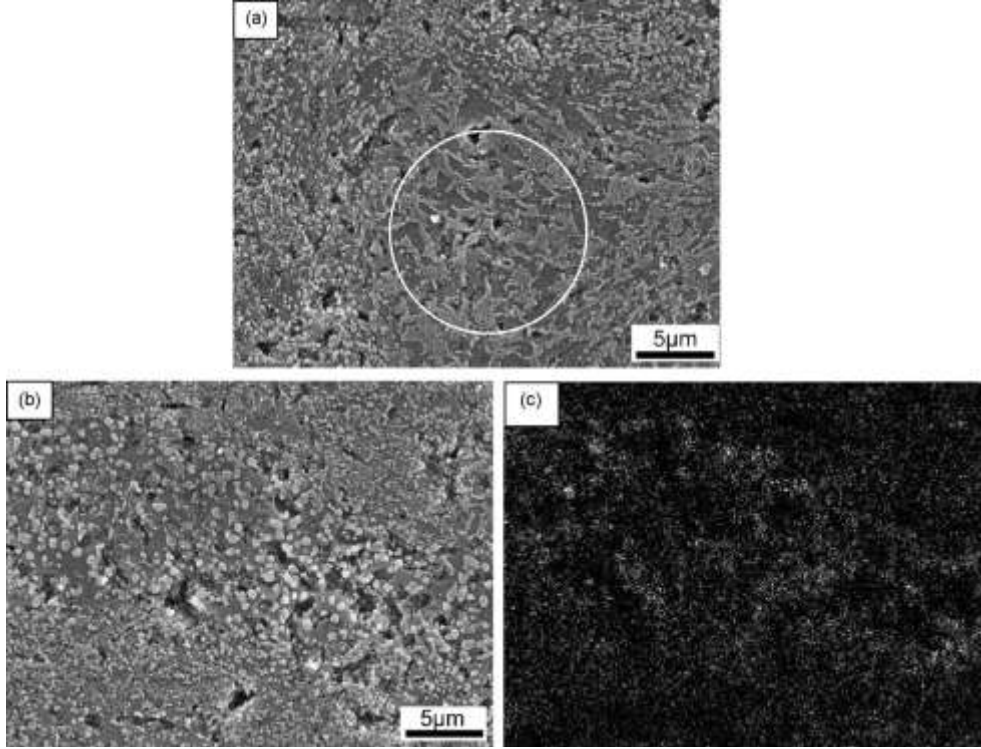
Şekil 2.40 : Tane boyutu –Parçacık hızı grafiği

Faz diyagramına (Şekil 2.37) bakıldığında, Al-12Si ergime noktası 577 °C civarında olduğundan 560 °C kaplam sıcaklığı olarak seçilmiştir. Bu sıcaklıkta 400 °C’ ye göre daha kalın kaplama elde edilmiştir. Şekil 2.41’den de anlaşılıyor ki arayüzey bağlanma kalitesi oldukça iyi ve yoğun bir kaplama elde edilmiştir.



Şekil 2.41 : 560 °C’ de yapılan kaplamanın optik mikroskop görüntüleri.

SEM görüntüleri incelenirse (Şekil 2.42) koyu gri faz alfa-alüminyum fazı açık gri faz silisyum fazı olduğu görülmektedir. Alfa alüminyum dendritik yapı içerisinde hapsedilmiş bir silisyum fazı görülmektedir. Beyaz daire içerisindeki kısım (Şekil 2.42.a) tozun orijinal morfolojisinden farklı bir görünümündedir. Bu kısımda yüksek sıcaklık etkisiyle yaşlanma olduğu belirlenmiştir. Yaşlanma olayı ile Si partikülleri alfa alüminyum fazı içerisinde çökelmiş ve disperse olmuşlardır. Çökelme sertleşmesi etkisiyle 560 °C’ de sertlikte önemli ölçüde artış olmuştur.



Şekil 2.42 : Kaplamanın SEM görüntüleri.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Amaç

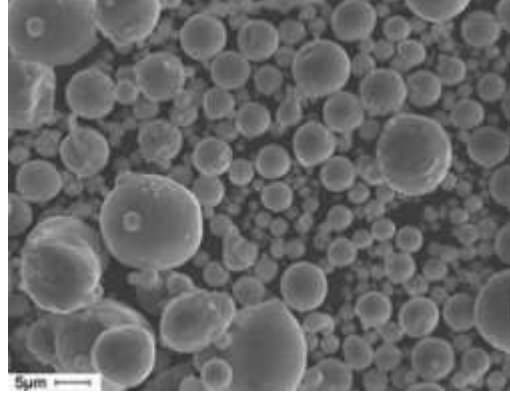
Bu çalışmada alüminyum–12 silisyum, alüminyum ve bor karbür tozları kullanılarak SDGP yöntemi ile oluşturulan kompozit kaplamaların karakterizasyonu; mikroyapı ve faz incelemeleri, sertlik ölçümleri, aşınma ve korozyon testleri ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda B₄C takviyesi ile mekanik özelliklerin gelişmesi öngörülmektedir.

3.2 Kaplamada Kullanılan Tozlar Ve Karakterizasyonu

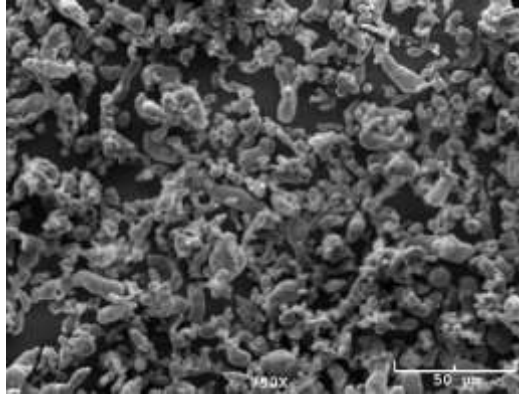
Bu çalışmada matris malzemesi olarak ağırlıkça yalnız alüminyum-12 silisyum ve alüminyum-12 silisyum+alüminyum karışımı kullanılmıştır (Çizelge 3.1). Al-12Si ve Al tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırası ile Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Matris malzemesi olarak kullanılan tozlar.

Toz	Alüminyum	Alüminyum-12 Silisyum
Firma	Alfa Aesar	Praxair
Bileşim	%99,5 Al	% 11,5 Silisyum % 88,3 Alüminyum % 0,2 Diğer
Boyut	-325 mesh	-250 mesh

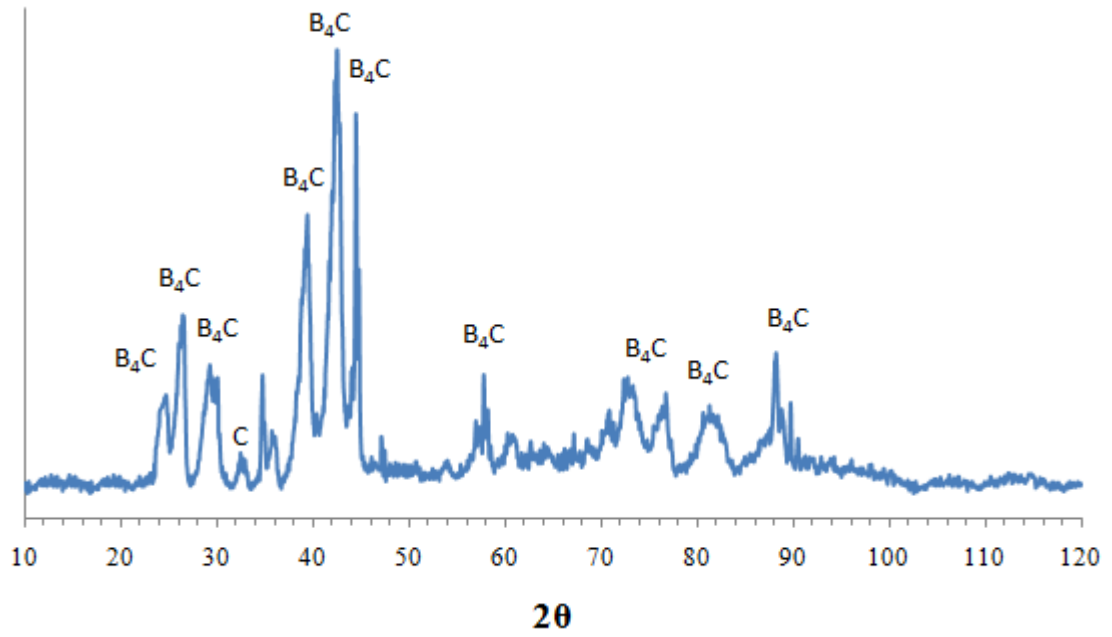


Şekil 3.1 : Al-12Si toz morfolojisi.



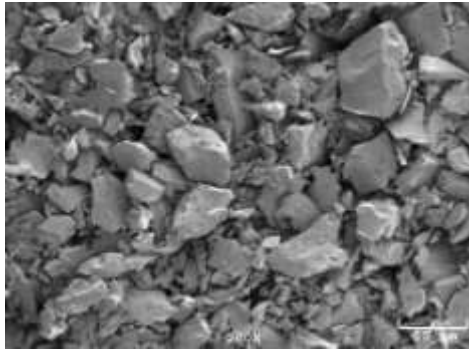
Şekil 3.2 : Alfa-aesar Al toz morfolojisi.

Bu çalışmada takviye elemanı olarak Çin menşeli B_4C tozları kullanılmıştır. Yabancı maddelerden uzaklaştırmak, keskin köşeleri gidermek ve boyut dağılımını ortalama bir değere yaklaştırmak düşüncesiyle bor karbür tozları asit çözeltisi (%50HF+%50HCl) içerisinde 16 saat bekletilmiştir. Bu süre zarfında büyük boyutlu tozlar dibe çökerken diğerleri çözelti yüzeyine çıkmıştır. Dibe çöken tozlar yıkanıp kurutulduktan sonra X-ışınları difraksiyon analizine ve taramalı elektron mikroskobu incelemelerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.3). X-ışınları difraksiyon paterninde bor karbür dışında sadece karbon pikine rastlanmıştır (Şekil 3.3.a). Asit öncesi ve sonrası toz morfolojileri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’ te sırasıyla verilmiştir.

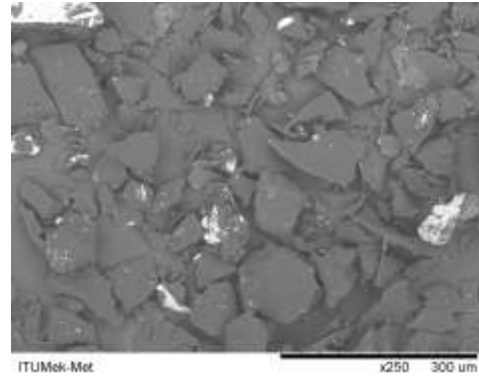


Şekil 3.3 : Asidik çözeltinin dibine çöken Çin menşeli bor karbür tozlarına ait X-ışınları difraksiyon paterni.

Asitleme işlemi toz morfolojisini değiştirmemiş ve küçük bıyutlu tozların uzaklaşmasına sebep olmuştur. Böylece ortalama tane boyutu asit işlemi öncesi 60 μm iken asit işlemi sonrası 69 μm değerine yükselmiştir (MASTERSIZER 2000).



a-)



b-)

Şekil 3.4 : Bor karbür tozunun a) asitle yıkama işlemi öncesi, b-) asitle yıkama sonrası morfolojisi.

3.3 Kaplamada Kullanılan Tozların Hazırlanması Ve Kaplama İşlemi

Soğuk dinamik gaz püskürtme işleminde besleme tozu olarak kullanılmak üzere, alüminyum, alüminyum–12 silisyum ve bor karbür tozları hacimce belirli yüzdelerde karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi kuru karıştırma tekniği ile yapılmıştır. Kuru karıştırma işlemi üç eksenle hareket eden WAB marka cihazda 2 saat süre ile gerçekleştirilmiştir.

Bor karbür takviyeli kompozit kaplamalar üretilmesinden önce alüminyum ile alüminyum-12 silisyum tozları değişik oranlarda karıştırılarak, çalışılacak en yüksek performanslı matris kompozisyonunu belirlemek adına kaplama işlemleri yapılmıştır. Bu kapsamda alüminyum–12 silisyum tozu hacimce %0, %25, %50 ve %75 olacak şekilde alüminyum tozu ile karıştırılmıştır. Dolayısıyla elde edilen matris kompozisyonları;

- % 100 Al-12Si
- %75 Al-12Si + %25 Al
- %50 Al-12Si + %50 Al
- %25 Al-12Si + %75 Al

olmuştur. Besleme tozları RUSONIC marka soğuk dinamik gaz püskürtme sistemi ile 6082 kalite Al altlık üzerine püskürtülmüştür. Püskürtme işlemi manüel olarak gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı gaz olarak 5 bar basınçta sahip hava kullanılmıştır. Kaplama işlemleri sırasında toz besleme hızı deneysel olarak 0,08 gram/saniye hesaplanmıştır.

3.4 Kaplamaların Karakterizasyonu

Kaplamaların karakterizasyonu mikroskobik incelemeler, X-ışınları difraksiyon analizi, sertlik ölçümleri, aşınma ve korozyon deneyleri ile yapılmıştır.

Mikroskobik incelemeler kaplanmış numunelerin kesitlerinde LEICA marka optik mikroskop ve HITACHI marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Kesit incelemeleri için numuneler standart metallografik yöntemler ile hazırlanmıştır.

Kaplamaların X-ışınları difraksiyon analizinde GBC marka X-ışınları cihazı kullanılmıştır. X-ışınları difraksiyon çalışmaları $\text{CoK}\alpha$ ışınması altında 10° ve 120° derece aralığında 1 derece/dakika hızla gerçekleştirilmiş olup tüp voltajı ve akımı sırasıyla 38kV ve 28,5mA olacak şekilde ayarlanmıştır.

Sertlik ölçümleri SHIMADZU HVM mikro sertlik cihazında vickers batıcı uç kullanılarak, 50 gram yük altında, 15 sn. süreyle yapılmıştır. Her bir numune için en az on ölçüm alınarak, ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır.

Aşınma deneyleri ileri-geri hareketli yükleme koşullarında, 24 ± 2 °C sıcaklık ve % 40 ± 2 nem ortamında TRIBOTECH marka aşınma cihazında yapılmıştır. Aşınma deneyleri hava ve su ortamında olmak üzere iki ayrı atmosferde yapılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında alümina top kullanılmıştır. Aşındırıcı top 100 gram yük altında 2 mm/s kayma hızında numune yüzeylerine sürmüştür. Aşınma deneylerinde aşınma iz uzunluğu 2 mm (strok) ve toplam kayma mesafesi 10m'dir. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı bilgisayar vasıtasıyla kaydedilmiştir. Deneyler sonrası aşınma izlerinin yüzey profilleri DEKTAK 6M tipi cihaz ile ölçülmüş ve elde edilen yüzey profillerinden aşınma iz alanları hesaplanmıştır. Ayrıca aşınma yüzeyleri optik ve taramalı elektron mikroskopları ile de incelenmiştir.

Korozyon deneyleri, oda sıcaklığında elektrokimyasal yöntemle yapılmıştır. Elektrolit olarak ağırlıkça % 3,5 tuz içeren saf su kullanılmıştır. Tarama aralığı; açık devre potansiyeli $\pm 0,5$ V, tarama hızı ise; 0,16 mV/sn olarak ayarlanmıştır.

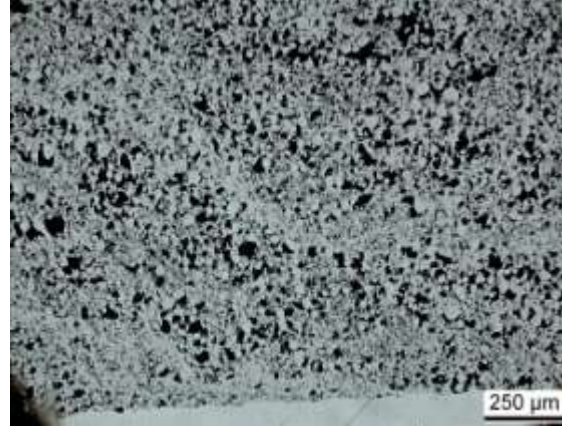
4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Kaplamaların Yapısal Özellikleri

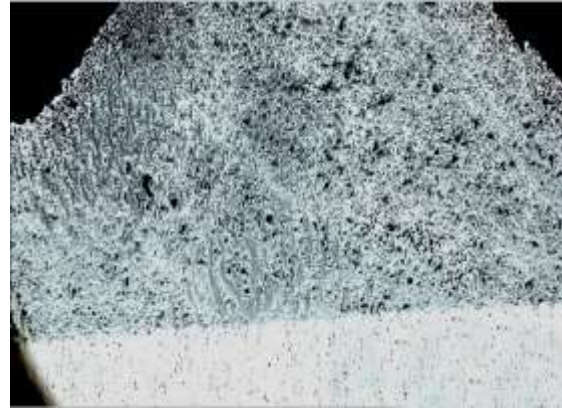
4.1.1 Matrisin yapısal özellikleri

Bor karbür takviyeli kompozit kaplamaların üretilmesinden önce alüminyum tozları hacimce %25, %50, %75 ve %100 Al-12Si olacak şekilde alüminyum – 12 silisyum tozları ile karıştırılmış ve kaplama işlemleri yapılmıştır. %100 alüminyum -12 silisyum, %75 alüminyum - 12 silisyum + %25 alüminyum, %50 Al-12Si + %50Al tozları ile yapılan kaplamalara ait optik mikroskop görüntüleri örnek olarak Şekil 4.1’de verilmiştir.

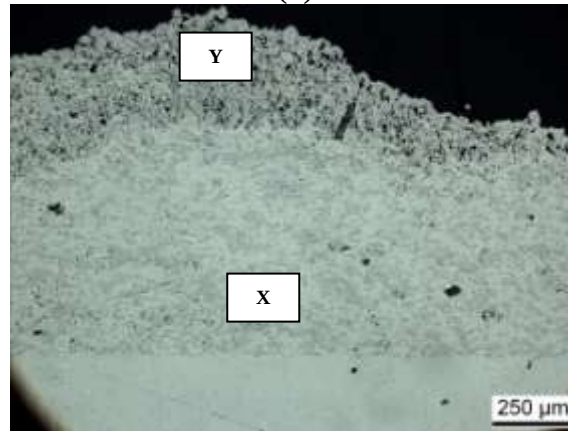
Optik mikroskop görüntülerinde tüm matris kompozisyonlarında kaplamanın altlığa iyi bağlandığı görülmektedir. Ancak %100 alüminyum-12 silisyum kaplama daha poröz (Şekil 4.1.a) bir yapıya sahiptir. Bu durum alüminyum-12 silisyum tozlarının altlığa çarpışması sırasında yeteri kadar kalıcı deformasyona uğramadıklarından kaynaklanmakta olup, besleme tozuna alüminyum ilavesi ile porozite azalmaktadır. Örneğin alüminyum-12 silisyum içerisine hacimce %25 oranında alüminyum ilavesi ile yapılan kaplamalarda altlığa yakın bölgelerde yoğun bir kaplama elde edilirken kaplamanın üst bölgelerinde poröz yapı bulunmaktadır (Şekil 4.1c). Bu sonuç püskürtmenin ilk başlarında alüminyum-12 silisyum tozları ile alüminyum tozlarının bir arada püskürtüldüğü ve yeteri kadar kalıcı deformasyona uğrayan alüminyum içerisinde alüminyum-12 silisyum tozlarının hapis olduğu ancak kaplamanın sonlarına doğru besleme tozu karışımında alüminyum tozunun tükenerek sadece alüminyum-12 silisyum tozunun püskürtüldüğünü göstermektedir. Bu durum farklı süneklığe ve toz boyutuna sahip alüminyum ile alüminyum-12 silisyum tozlarının aynı hava akımı içerisinde farklı hızlanarak farklı çarpışma özelliği göstermesinden kaynaklanmaktadır.



(a)



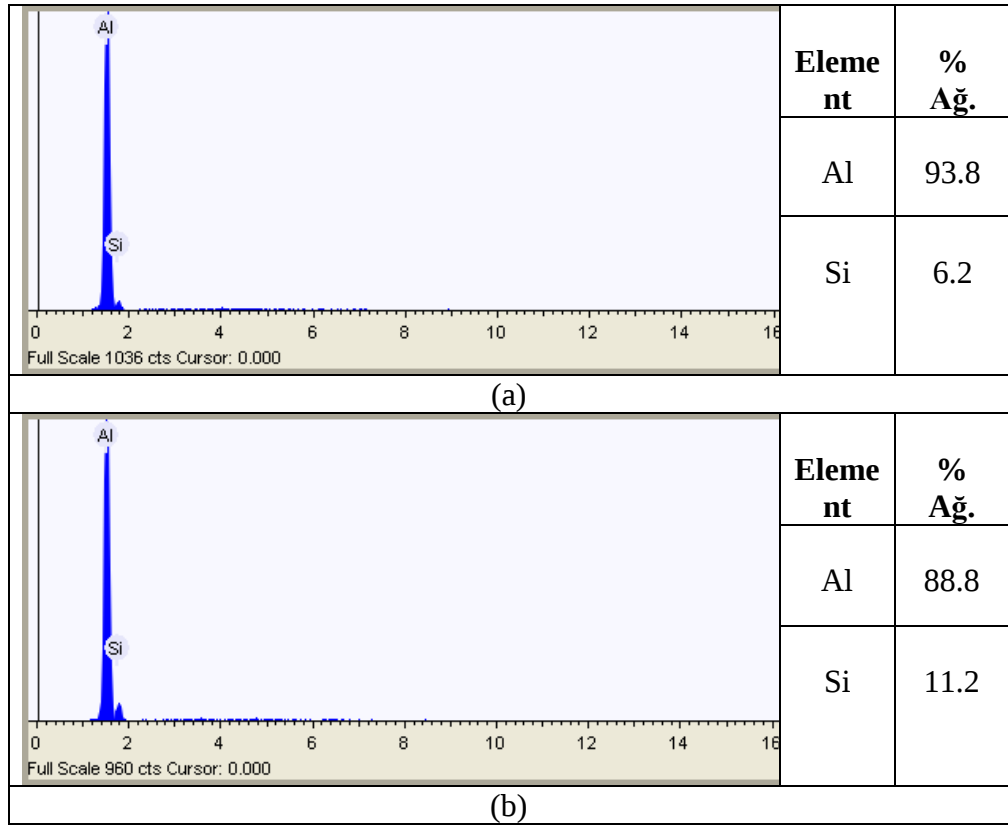
(b)



(c)

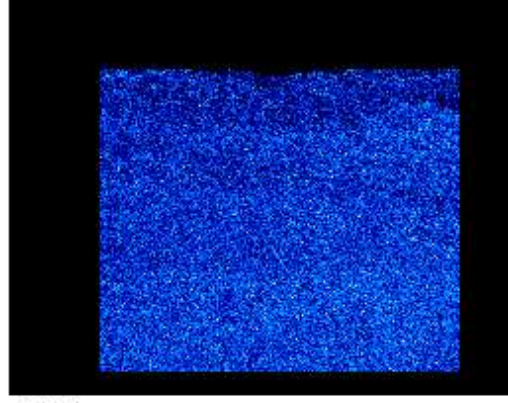
Şekil 4.1 : SDGP ile kaplanan a-) %100 Al-12Si b-) %50 Al-12Si + %50 Al c-) %75 Al-12Si + %25 Al matrislerinin optik mikroskop görüntüleri (X: arayüzeye yakın bölge, Y: arayüzeye uzak bölge).

Taramalı elektron mikroskobu çalışmaları sırasında gerçekleştirilen kimyasal analize (EDS) ait sonuçlar, %75 alüminyum-12 silisyum + % 25 alüminyum için Şekil 4.2’de verilmiştir. Buna göre, Şekil 4.1.c’de “Y” ile gösterilen altlığa uzak bölgede tamamen alüminyum-12 silisyum bulunmaktadır.



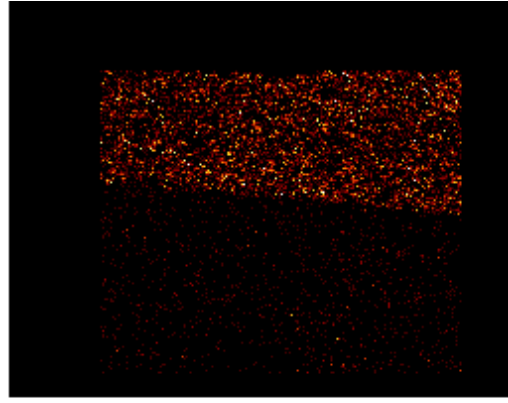
Şekil 4.2 : %75 Al-12Si + %25 Al tozuyla gerçekleştirilen kaplamanın altlık ara yüzeyine (a) yakın ve (b) uzak bölgelerine ait kimyasal analiz sonuçları. Altlık ara yüzeyine yakın ve uzak bölgeler Şekil 2.b’de sırası ile X ve Y olarak gösterilmiştir.

Altlığa yakın “X” bölgesinde ise silisyum miktarı daha düşüktür. Hacimce %75 alüminyum – 12 silisyum %25 alüminyum içeren matris üzerinde yapılan element haritalama çalışmaları da bu sonucu desteklemektedir (Şekil 4.3). Şekil 4.3.a’da görüldüğü gibi alüminyum kaplamanın her yerinde mevcut iken silisyum (Şekil 4.3.b) kaplamanın üst bölgelerinde daha yoğun olarak bulunmaktadır.



Al Kα1

(a)



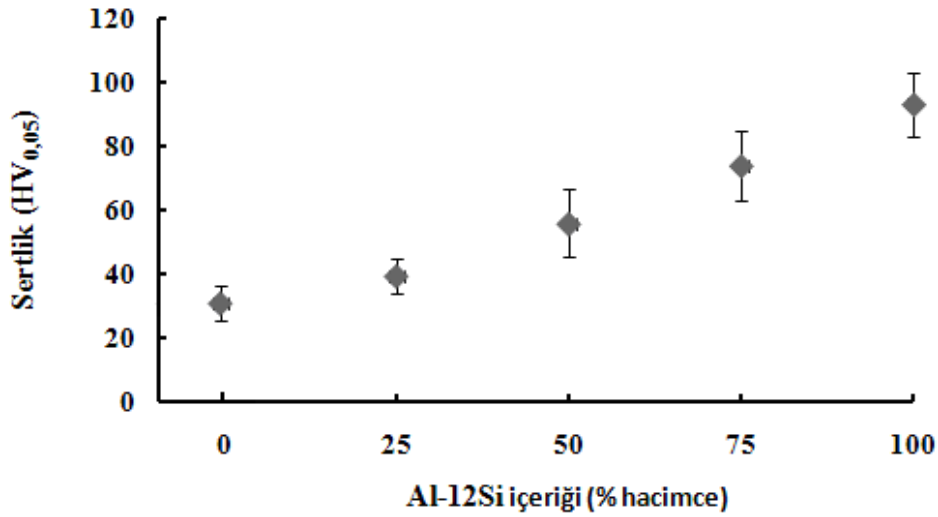
Si Kα1

(b)

Şekil 4.3 : Hacimce %75 alüminyum-12 silisyum + %25 alüminyum içeren matris üzerinde yapılan element haritalandırma çalışmalarına ait fotoğraflar.

4.1.2 Matrisin sertliği

Farklı oranlarda alüminyum-12 silisyum ve alüminyum karıştırılarak üretilen kaplamaların sertlik deney sonuçları Çizelge A.1 ve Şekil 4.4' de verilmiştir. Besleme tozunda alüminyum içerisine alüminyum-12 silisyum tozunun ilavesi ile kaplama sertliği artmaktadır. % 75 alüminyum - 12 silisyum ilavesi ile sertlik değeri 70,5 $Hv_{0,05}$ değerine çıkarken %100 alüminyum - 12 silisyum kaplamanın sertlik değeri ise 99,8 $Hv_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. Sertlik değerindeki artışa paralel olarak standard sapma değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bu durumun alüminyum-12 silisyum miktarındaki artış ile birlikte mikro yapıdaki porozite miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



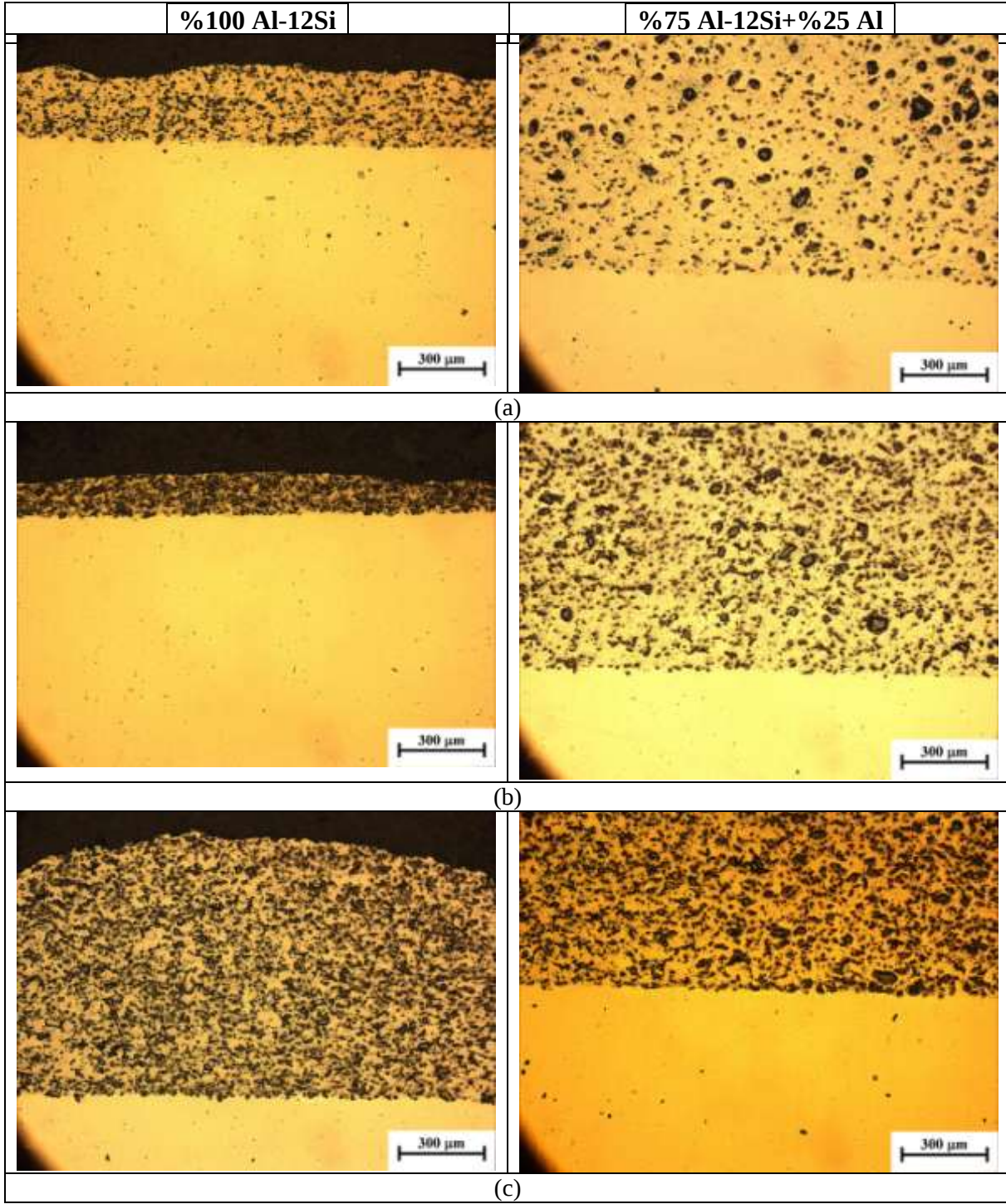
Şekil 4.4 : Alüminyum ve alüminyum - 12 silisyum tozları ile yapılan matris çalışmalarından elde edilen sertlik sonuçları.

Bu sonuçlara göre % 100 Al-12Si ve %75 Al-12Si + %25 Al matris kompozisyonları tasarlanan 4 matris içerisinde en yüksek mekanik performansa sahip olan kompozisyonlar olarak açıkça ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bor karbür takviyesi yapılmasına karar verilen matris kompozisyonları bu iki değerdir. Bundan sonraki bor karbür takviyeleri bu matrislere yapılacaktır.

4.1.3 Bor Karbür Takviyesi İle Kompozit Kaplamaların Yapısal Özellikleri

% 50 HF - % 50 HCl asit çözeltisi içerisinde bekletilen Çin menşeli bor karbür tozu ile alüminyum ve alüminyum - 12 silisyum tozlarının değişik oranlarda kuru karıştırıcıda karıştırılmasıyla üretilen besleme tozlarının püskürtülmesi ile oluşturulan kaplamaların optik ve taramalı elektron mikroskop görüntüleri, EDS çalışması sonuçları ile hacimce %20 bor karbür içeren kaplamaların X-ışınları difraksiyon paternleri sırasıyla Şekil 4.5- Şekil 4.8 arası verilmiştir.

Kaplama işlemleri sırasında aynı boyutlara sahip altlıklar üzerine aynı miktarda toz püskürtülmesi dikkate alındığında %100 alüminyum-12 silisyum matrisli kaplamalarda bor karbür miktarı arttıkça kaplama kalınlığı artmaktadır. Alüminyum-12 silisyum+alüminyum matrisli bor karbür takviyeli kompozit kaplamalarda Şekil 4.1.b' deki gibi toz dağılımı açısından farklı bölgelerin mevcudiyeti dikkat çekmemiştir. Bu gözlemler besleme tozuna bor karbür ilavesi ile kaplama veriminin arttığının ve homojen kaplama elde edildiğinin işaretidir.



Şekil 4.5 : %100 Al-12Si ve %75 Al-12Si matrise sahip a-) %5, b-) %10 ve c-) %20 B₄C partikül takviyeli kaplamaların kesitlerine ait optik mikroskop görüntüleri.

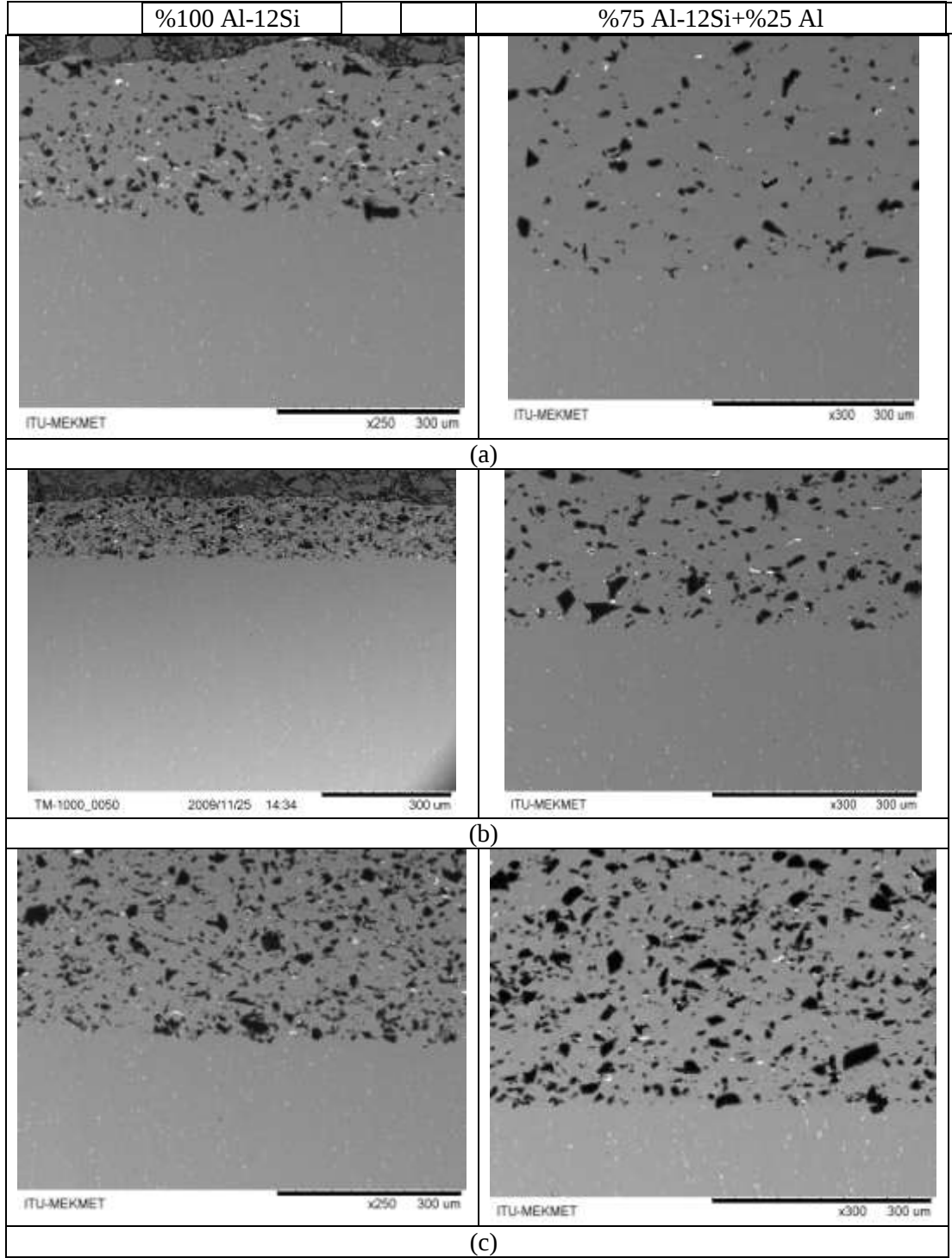
Şekil 4.5' teki optik mikroskop görüntülerinden de anlaşıldığı gibi kaplama-altlık arayüzeyi süreksiz bir yapıda, yapışma kabiliyeti oldukça iyi durumdadır. Kaplamalardaki siyah partiküller bor karbür partikülleri olup matris içerisinde dağılmışlardır. Matrise Al ilavesi ile kaplama kalınlığı yüksek bir trend ile artış göstermektedir.

Şekil 4.6' daki taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde kaplama arayüzey kalitesi daha net bir şekilde görülmektedir. Partiküllerin altlık malzemeye penetrasyonu oldukça iyi kalitede olup, arayüzeyde herhangi bir süreksizlik ya da boşluklu yapı görülmemektedir.

Optik ve taramalı elektron mikroskop çalışmaları bor karbür takviyeli kaplamaların yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğunu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde sıkıca bağlandığını ortaya çıkarmıştır. Bor karbürler, yüksek hızlı püskürtme etkisi ile plastik olarak deformasyona uğramış olan alüminyum ve alüminyum - 12 silisyum tozları tarafından çevrelenmiş, diğer bir deyişle alüminyum tozları arasında hapis olmuş durumdadır.

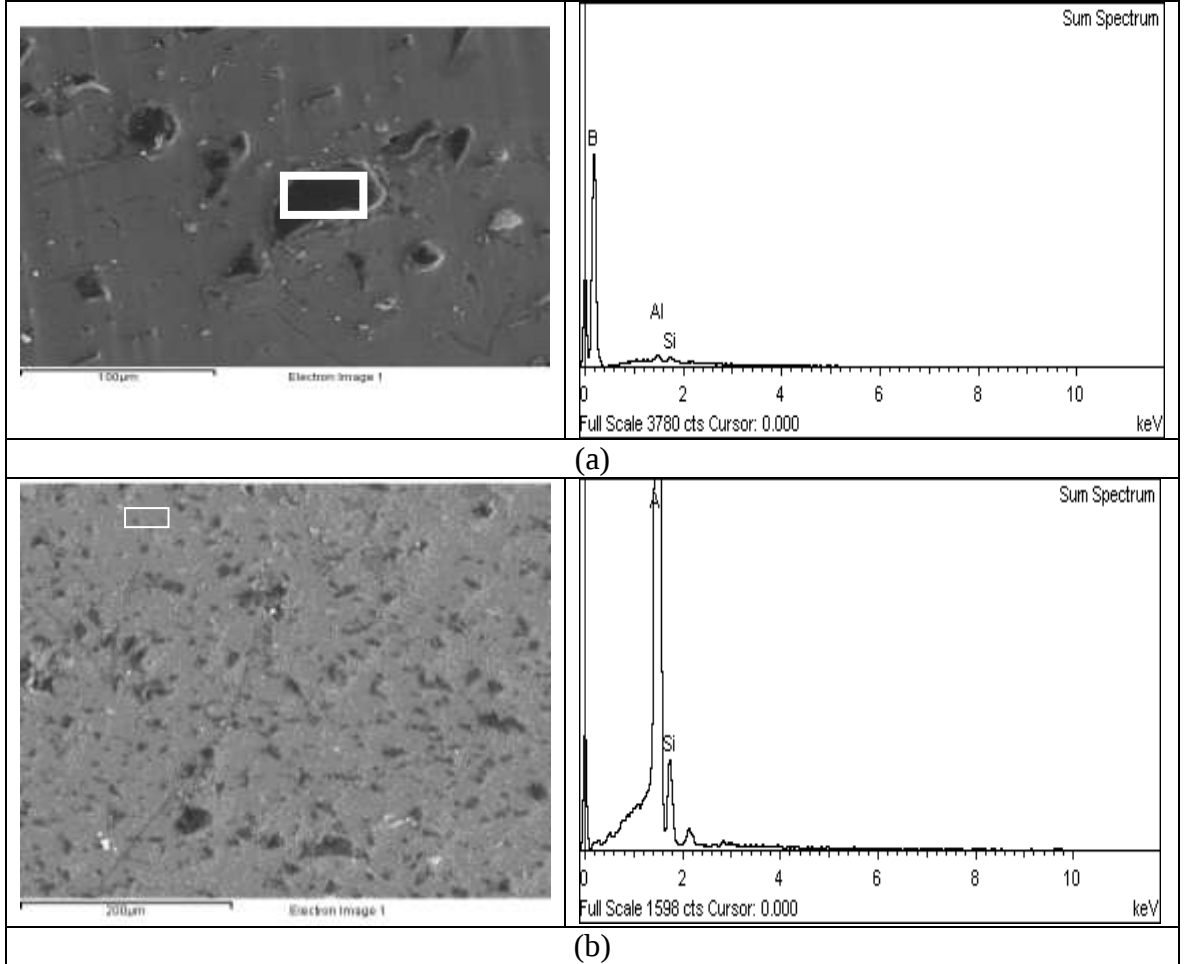
Şekil 4.6' da taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde bor karbür partiküllerinin yapısı optik mikroskop görüntülerine göre daha net bir biçimde görülmektedir. Kaplama içerisindeki bor karbür morfolojisi, kaplama öncesi (Şekil 3.5) morfoloji ile paralellik göstermektedir. Bu sonuç SDGP yönteminin doğasından kaynaklanan malzemelerin kaplandıktan sonra da aynı fiziksel özelliklerini muhafaza etmesinden ileri gelmektedir.

Taramalı elektron mikroskobu görüntülerine dikkatle bakıldığında yapı içerisinde beyaz renkli küçük bölgeler görülmektedir. Yapılan analizlere ve literatüre göre [20] (Şekil 2.26.d) bu noktaların nozülün aşınması sonucu nozülden ayrılan paslanmaz çelik partikülleri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.6 : %100 Al-12Si ve %75 Al-12Si+%25 Al matrise sahip (a) %5, (b) %10 ve (c) %20 bor karbür takviyeli kompozit kaplamaların kesitlerine ait taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Mikro yapı incelemeleri sırasında yapılan kimyasal analiz çalışmaları ile mikro yapıda bulunan farklı renklerdeki bölgelerin bileşimleri belirlenmiştir. Şekil 4.7’ da gösterildiği gibi koyu renkli bölgeler bor, açık renkli bölgelerin alüminyum ve silisyum içermektedir.

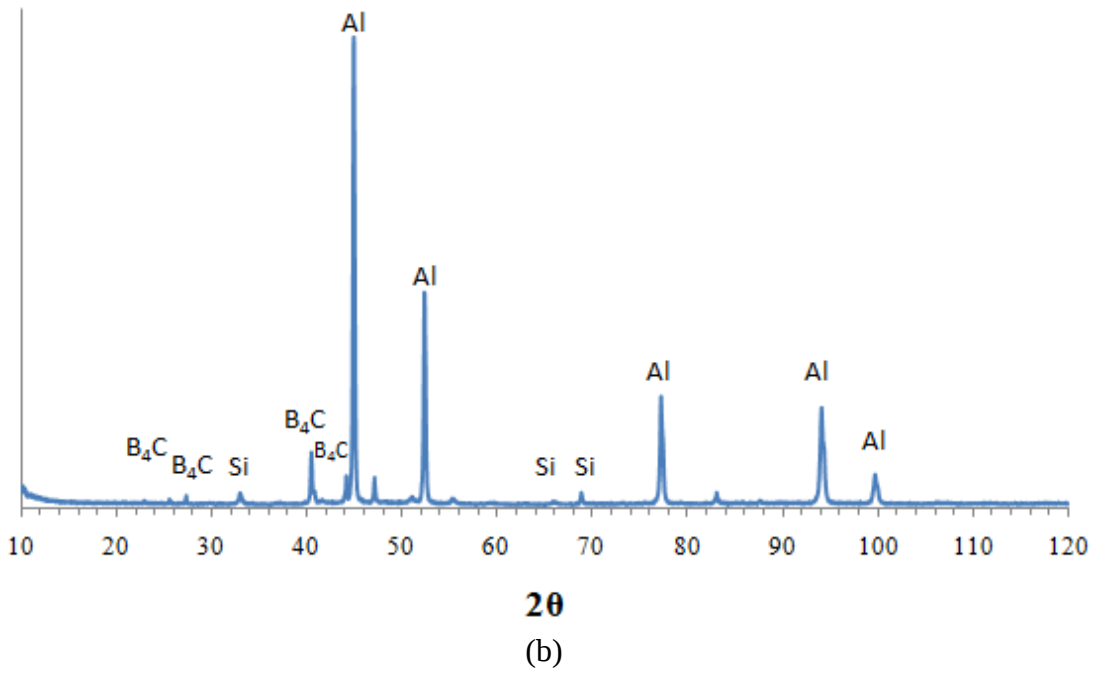
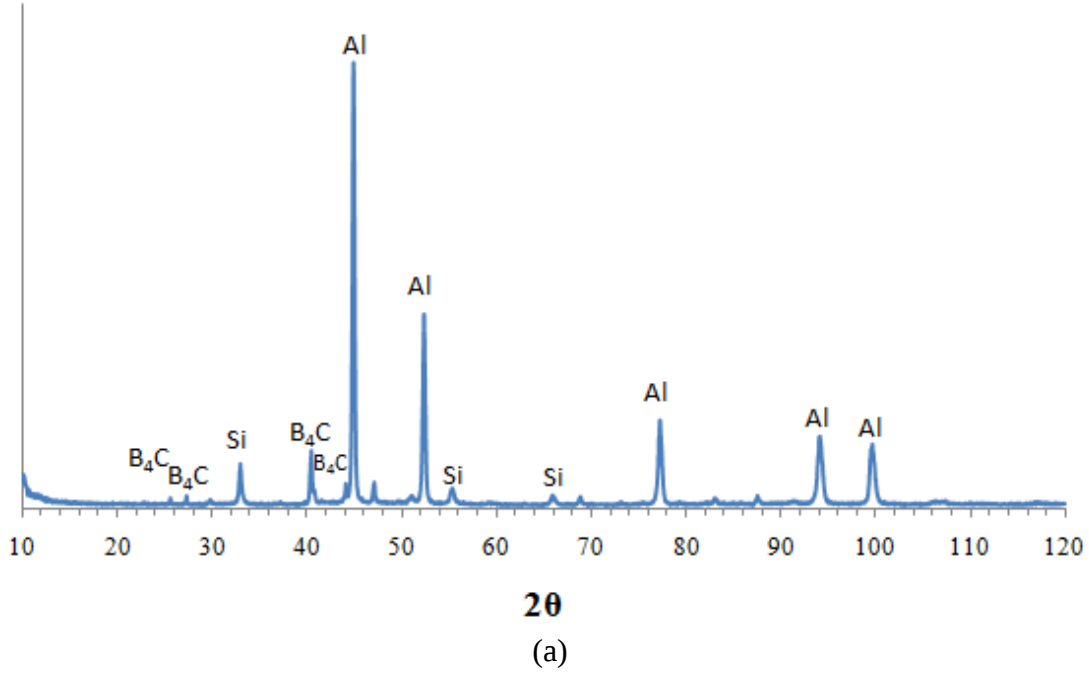


Şekil 4.7 : (a) %75 alüminyum – 12 silisyum + %25 alüminyum matrisli % 5 bor karbür içeren kaplamanın ve (b) alüminyum – 12 silisyum matrisli %20 bor karbür içeren kaplamanın taramalı elektron mikroskop görüntüleri ve kimyasal analiz sonuçları. (fotoğraflardaki çerçevelendirilmiş bölgeler için).

Şekil 4.8 ‘ de her iki matrise ait %20 B₄C takviyeli kompozit kaplamaların X-ışınları difraksiyon analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 4.8.a’ da Si pikleri, Şekil 4.8.b’ de ise Al pikleri daha şiddetlidir.

XRD paternlerine bakıldığında yapıda Al, Si, ve B₄C bileşenlerinden başka herhangi bir bileşen görülmemektedir. Başka bir deyişle SDGP ile üretilen kompozit

kaplamalarda işlem sonrası herhangi bir faz dönüşümü, kimyasal reaksiyon ve yeni ürün oluşumu gerçekleşmemiştir.



Şekil 4.8 : %20 bor karbür içeren (a) %100 Al - 12Si matrisli ve (b) %75 Al - 12Si + %25 alüminyum matrisli kompozit kaplamaların X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları.

Genel olarak bakıldığında, bor karbür ilavesi ile matris çalışmalarına göre daha uniform ve daha düşük poroziteye sahip bir yapı görülmektedir. Yapısal incelemelere göre arayüzey bağlanma kalitesi matriste olduğu gibi yüksektir. Herhangi bir

süreksizlik görünmemekle beraber, takviyeli kaplamalarda arayüzey sınırı oldukça belirsiz altlığa iyi bağlanmış bir durumdadır.

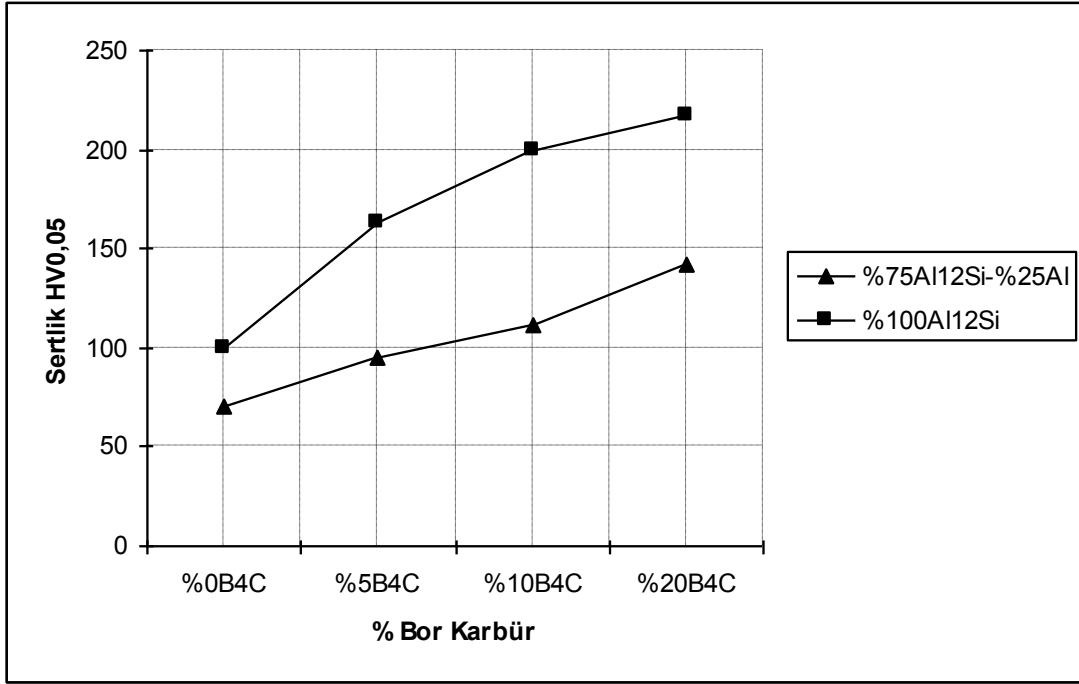
4.1.4 B₄C takviyesi ile üretilen kompozit kaplamaların sertliği

Asit içerisinde bekletilmiş Çin menşeli bor karbür ile alüminyum - 12 silisyum ve alüminyum tozlarının kuru karıştırıcıda karıştırılmasıyla elde edilen besleme tozundan üretilen kompozit kaplamaların sertlik değerleri Çizelge A.2’de verilmiş ve Şekil 4.9’ da grafiği çizilmiştir.

Artan bor karbür içeriği ile her iki matrisli kompozit kaplama için sertlik değerlerinde artış meydana gelmektedir. Belirli bir B₄C oranında, Al – 12Si tozuna alüminyum ilavesi kompozit kaplamalara ait sertlik değerlerinin düşmesine neden olmuştur.

Kaplamalarda en yüksek sertlik değeri % 100 Al-12Si matrisli %20 B₄C takviyeli kompozit kaplamaya aittir. Her iki matrise de yalnızca %5 oranında B₄C takviyesi yapıldığında sertlik yaklaşık %45-%50 oranında artmaktadır.

%100 Al-12Si matrise % 20 B₄C takviyesi ile sertlikte yaklaşık %120, %75 Al-12Si+%25 Al matrise %20 B₄C takviyesi ile yaklaşık %200 oranında artış olmuştur.



Şekil 4.9 : “Al-12Si ve Al-12Si+Al” tozlarına ilave edilen B₄C’nin kaplama sertliğine etkisi.

4.2 Aşınma Deneyi

4.2.1 Kuru ortamda aşınma deneyi

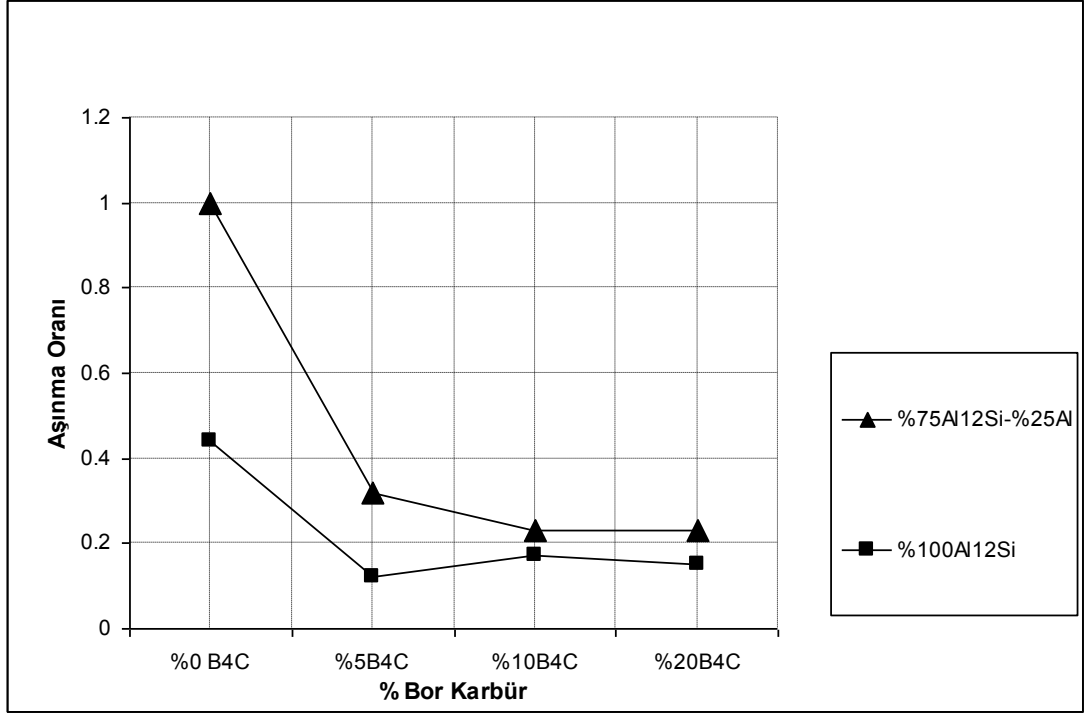
Kuru ortam koşullarında yapılan aşınma deneyleri sırasında kaplama yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu profilleri Şekil A.3’ te verilmiştir. Takviyesiz matrislerin aşınma izleri incelendiğinde %100 alüminyum-12 silisyum tozuna alüminyum ilavesi ile aşınma izinin daha belirginleştiği görülmektedir. Ancak her iki matrise bor karbür ilavesi ile daha az belirgin aşınma izleri elde edilmiştir. İki boyutlu profillerinin genişlik ve derinliği ölçülerek;

$$\text{Aşınma Izi Alanı} = \frac{\pi}{4} \times \text{aşınma izi derinliği} \times \text{aşınma izi genişliği} \quad (4.1)$$

bağıntısında aşınma iz alanları hesaplanmıştır (Çizelge A.2).

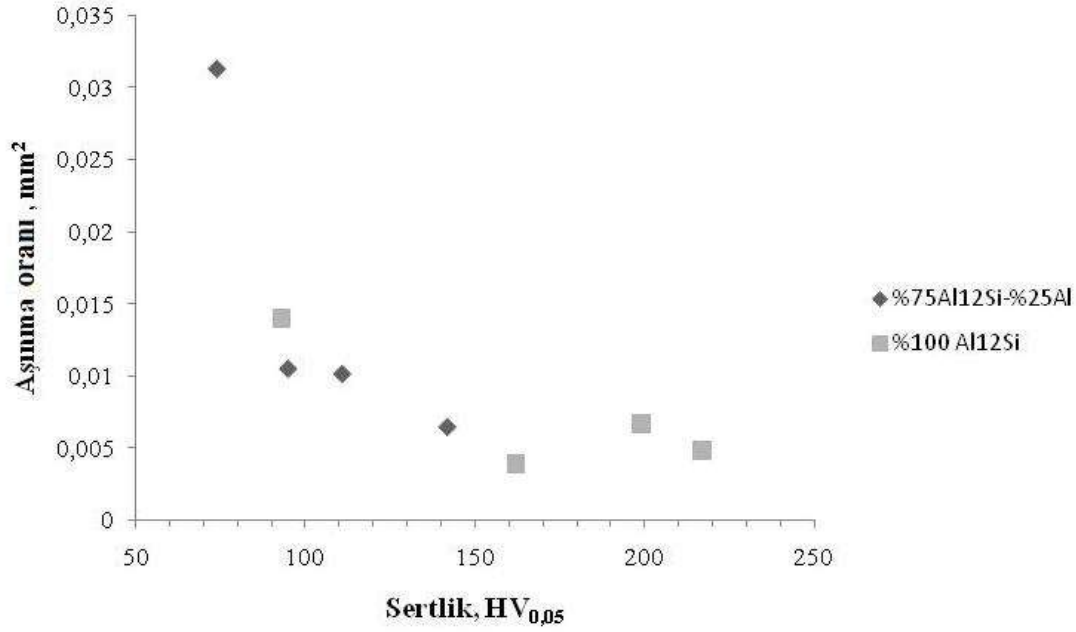
En büyük aşınma iz alanın bor karbür takviyesiz %75Al-12Si+%25Al matris kaplamada elde edilmiştir. Bu kaplamanın aşınma oranı “1” kabul edilerek bir referans noktası oluşturulmuş ve diğer kaplamaların aşınma oranı bu değerlere göre hesaplanmıştır. Aşınma oranının besleme tozundaki bor karbür hacim oranı ile değişimi Şekil 4.10’ de görülmektedir. Bor karbür takviyesi ile aşınma direnci %100

alüminyum-12 silisyum matrisli kaplamalarda yaklaşık 3 kat ve hacimce %75 alüminyum-12 silisyum+%25 alüminyum matrisli kaplamalarda yaklaşık 2 kat gelişmiştir. Ancak besleme tozundaki bor karbür hacim oranının % 5’ den % 20’ a artırılması kaplamaların aşınma dirençlerinde belirgin bir değişime sebep olmamıştır.



Şekil 4.10 : Al-12 Si” ve “Al-12 Si + Al” matrisli kompozit kaplamanın aşınma oranına B₄C miktarının etkisi.

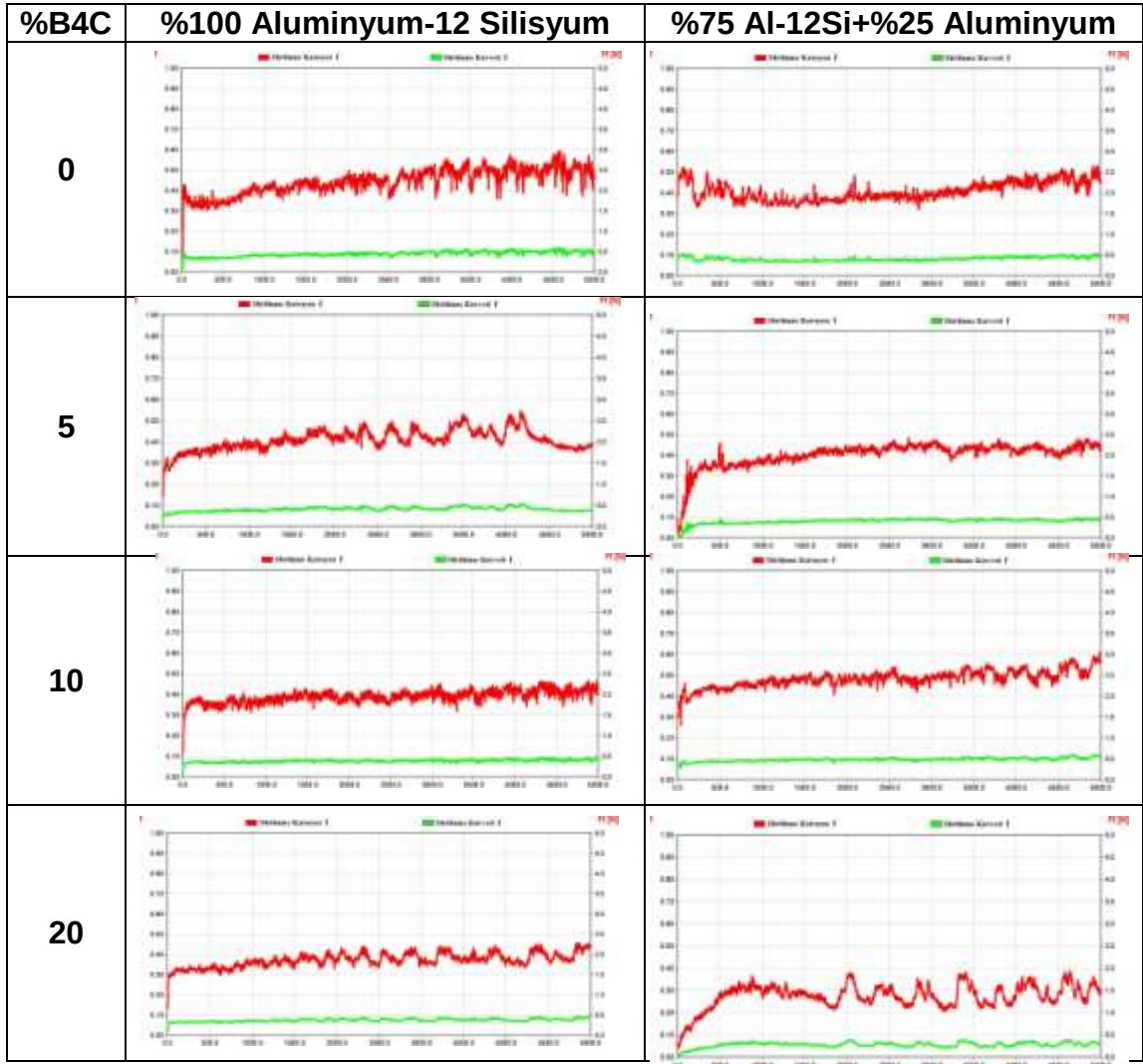
Artan sertlik ile aşınma kaybı azalmaktadır (Şekil 4.11). Bu durum özellikle 150 Hv_{0,05} kaplama sertliğine kadar geçerlidir. 150 Hv_{0,05} daha yüksek sertlikteki kompozit kaplamalarda aşınma kaybında çok belirgin bir azalma olmamıştır. Bu kritik sertlik değerine (150 Hv_{0,05}) %100 alüminyum – 12 silisyum tozuna yaklaşık %5 bor karbür veya %75 alüminyum – 12 silisyum + %25 alüminyum toz karışımına yaklaşık %20 bor karbür ilavesiyle ulaşılabilir.



Şekil 4.11 : Aşınma oranı-sertlik grafiği.

Kaplamaların sürtünme katsayısının aşınma süresince değişimi Şekil 4.12’ de verilmiştir. Çizelge 4.2’ de bu grafikler esas alınarak sürtünme katsayısı kararlı hal değerleri görülmektedir. Bu parametreler değerlendirildiğinde, bor karbür ilavesi ile kararlı hal sürtünme katsayısı %30-%35 oranında düşmektedir. Aşınma başlangıcında sürtünme katsayısı hızla arttıktan sonra kararlı bir değere (kararlı sürtünme katsayısı değeri) ulaşmaktadır.

Bor karbür takviyesi ile aşınma direnci %100 alüminyum - 12 silisyum matrisli kaplamalarda yaklaşık 3 kat ve hacimce %75 alüminyum - 12 silisyum + %25 alüminyum matrisli kaplamalarda yaklaşık 2 kat gelişmiştir. Ancak besleme tozundaki bor karbür hacim oranının % 5’den % 20’a artırılması kaplamaların aşınma dirençlerinde belirgin bir değişime sebep olmamıştır.

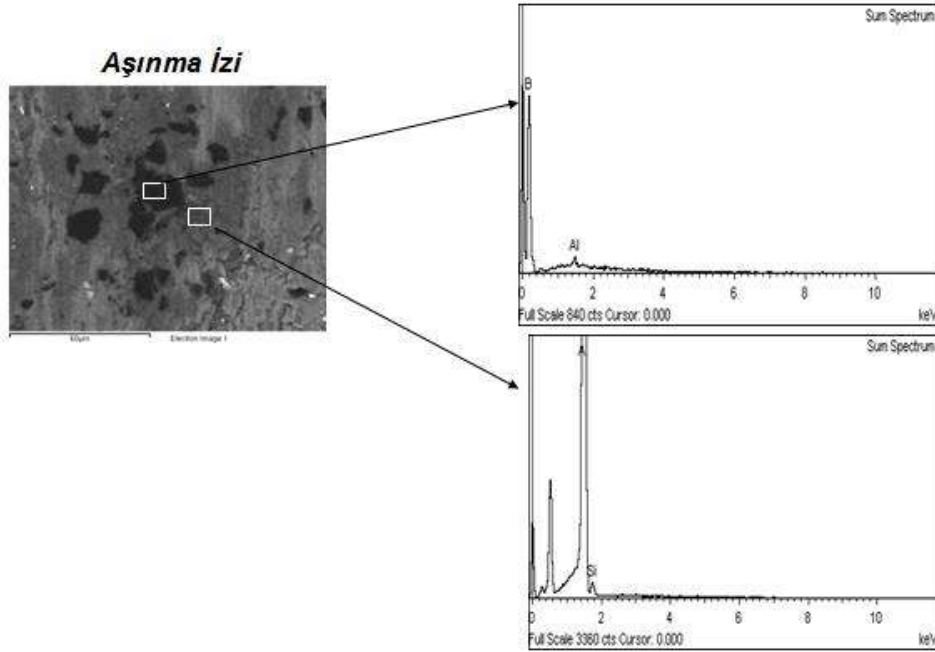


Şekil 4.12 : İncelenen kaplamaların sürtünme katsayısı grafikleri.

Çizelge 4.1 : “Al-12Si ve Al-12Si+Al” matrisli B₄C takviyeli kaplamalara ait kararlı hal sürtünme katsayısı grafikleri.

Kaplama	Kararlı hal sürtünme katsayısı	
	Kuru Ortam	Sulu Ortam
%75 Al-12Si+%25 Al+% 5 B ₄ C	0,40	0,37
% 75 Al-12Si+%25 Al+%10 B ₄ C	0,48	0,15
% 100 Al-12Si + %5 B ₄ C	0,41	0,15
%100 Al-12Si + %10 B ₄ C	0,38	0,15

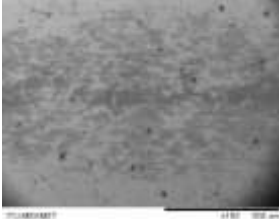
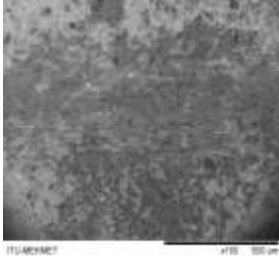
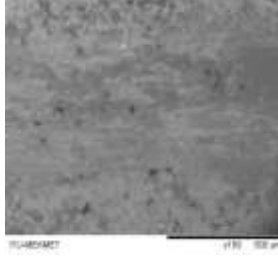
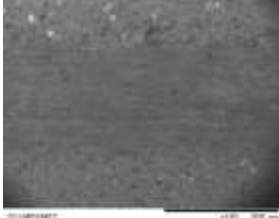
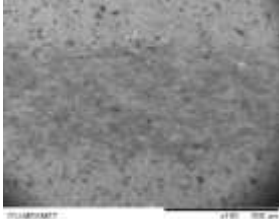
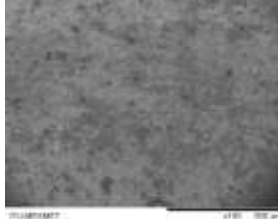
Aşınma izlerinde koyu renkli bölgelerin bor karbür olduğu (Şekil 4.13) EDS analizi ile belirlenmiştir. Dolayısıyla bor karbür partikülleri aşınma deneyi sırasında yapıdan ayrılmayarak aşınmayı önlemiş başka bir deyişle aşınma direncini arttırmıştır.



Şekil 4.13 : % 100 Al-12Si matrisli %20 B₄C takviyeli kaplamadaki aşınma izinin siyah renkli bölgelerin EDS analizi.

Takviyesiz matrislerin aşınma izleri (Şekil 4.14) incelendiğinde %100 alüminyum - 12 silisyum tozuna alüminyum ilavesi ile aşınma izinin daha belirginleştiği görülmektedir. Ancak her iki matrise bor karbür ilavesi ile daha az belirgin aşınma izleri elde edilmiştir.

Aşınma yüzeylerine göre (Şekil 4.14) aşınma izleri makroskobik düzeyde kayma yönünde yönelmiş aşınma izleri içermekte olup karakteristik kazımalı aşınma görünümüne sahiptir. Başka bir deyişle aşınma yiv oluşumuyla gerçekleşmiştir.

%B4C	%100 Alüminyum-12 Silisyum	%75 Al-12Si+%25 Alüminyum
0		
5		
10		
20		

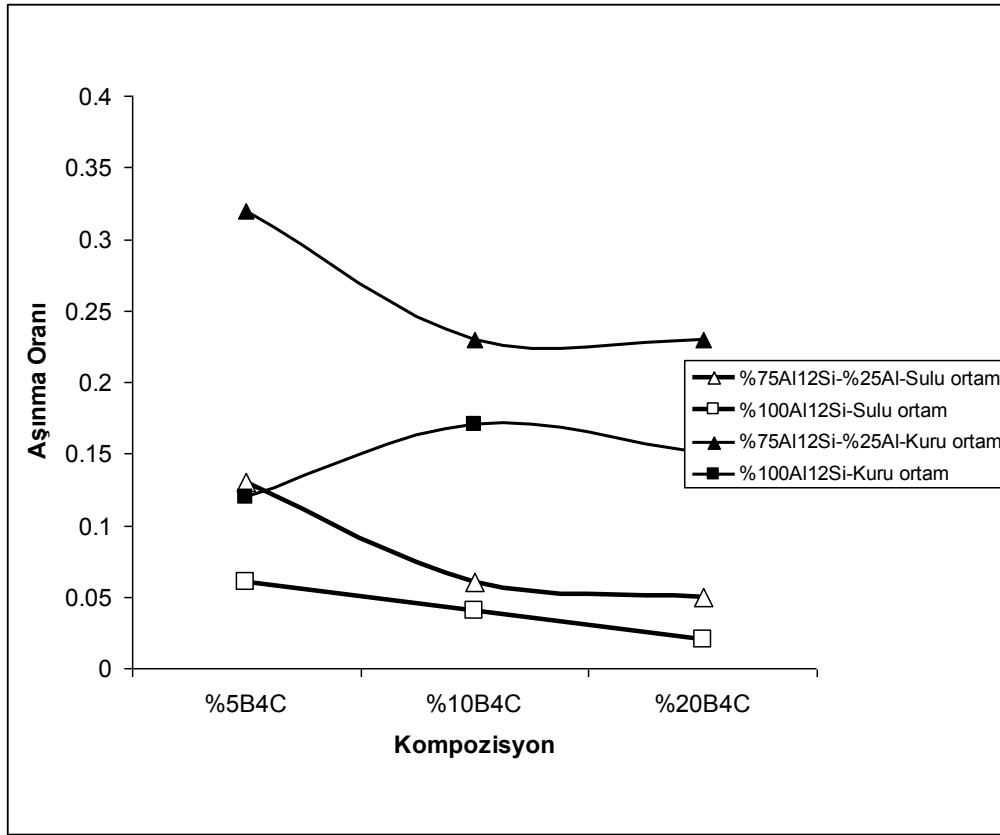
Şekil 4.14 : Aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Alumina top izlerine bakılacak olursa (Şekil A.5 ve Şekil A.6) %100 Al-12Si matrise sahip kaplamalarda alumina topa daha az madde transferi olduğu görülmektedir. Bu da aşınma direncinin bu matrise sahip kompozisyonlarda daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Hava ortamında yapılan aşınma deneylerinin sonuçları kısaca özetlenecek olursa matris bazında %75 Al-12Si+%25Al kompozisyonuna sahip olan matris %100 Al-12Si matrise göre yaklaşık 2 kat daha fazla aşınmıştır. Buna paralel olarak %100 Al-12Si matrisli bor karbür takviyeli kaplamalar daha iyi aşınma direnci eğilimine sahiptir. Takviyeli kompozit kaplamalarda B₄C kompozisyon oranının %5'ten %20'ye artırılması aşınma direncinin artmasında radikal bir değişime sebep olmamıştır.

4.2.2 Sulu ortamda aşınma deneyleri

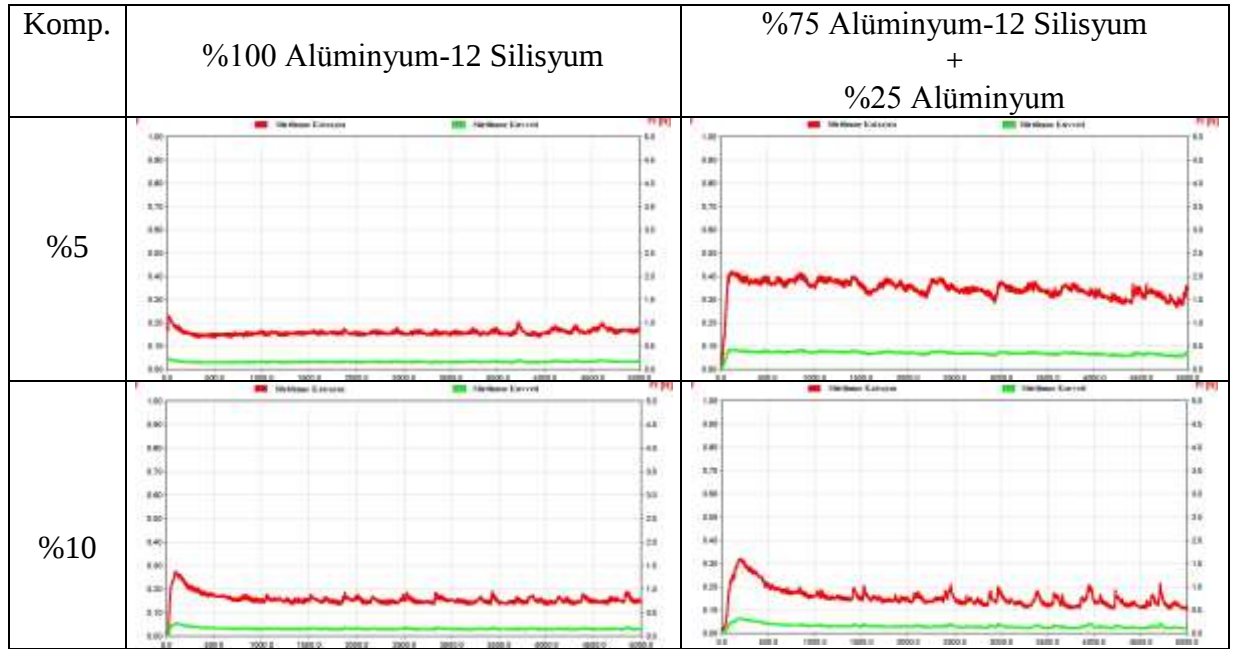
Su ortamında yapılan aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin iki boyutlu profilleri Şekil A.4' te verilmiştir. Profil ölçümleri sonrası elde edilen aşınma iz alanı kullanılarak (Çizelge A.3) aşınma oranı hesaplanmıştır. Su ortamında yapılan aşınma deneylerinde elde edilen aşınma oranı kaplamanın B₄C içeriğine göre değişimi kuru ortam aşınma deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15' te verilmiştir. Sulu ortamda yapılan aşınma deneyinde kompozit kaplamaların aşınma oranı oldukça düşmüştür.



Şekil 4.15 : Su ortamında aşınma oranı-kompozisyon değişimi grafiği.

Ek olarak, suda aşınma davranışını kendi çerçevesinde incelersek hava ortamındaki aşınma davranışına paralellik göstermektedir. Bor karbür oranı arttıkça aşınma direncinde genel olarak bir artış söz konusudur. Belli bir bor karbür oranından sonra aşınma direncinde radikal bir değişim sulu ortamda da görülmemektedir. Grafiğe göre özellikle %10 B₄C oranından sonra aşınma oranı eğrisi yatay konumlanmıştır.

Sulu ortamda da %100 Al-12Si matrise sahip kompozit kaplamalar daha iyi aşınma direnci eğilimine sahiptir.



Şekil 4.16 : Sulu ortamda sürtünme katsayısı-sürtünme kuvveti grafikleri.

Sürtünme katsayısı (kırmızı eğri) ve sürtünme kuvveti grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.16), hava ortamında yapılan aşınma deneylerine kıyasla ciddi bir düşme gözlenmektedir. Sürtünme katsayılarında yaklaşık %55-%60 oranında bir azalma olmuştur.

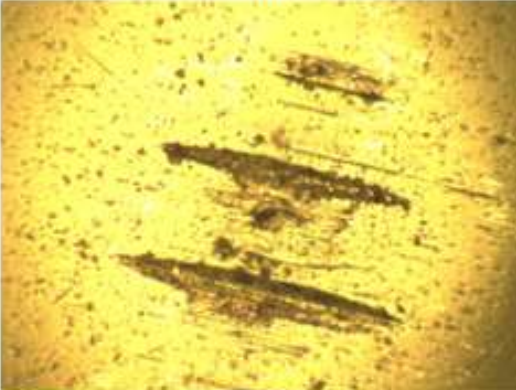
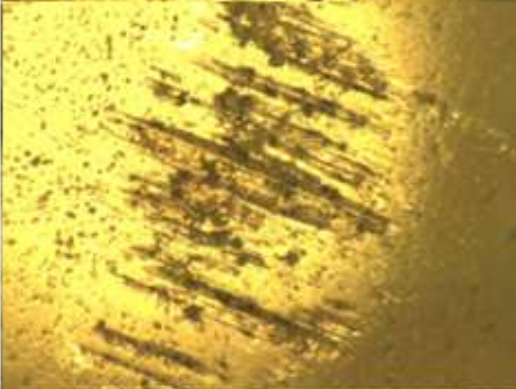
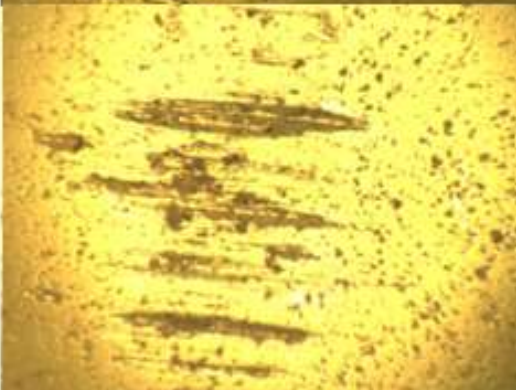
Kararlı hal sürtünme katsayılarının karşılaştırılması da bu sonuca paralel olarak Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Kuru-sulu ortam karşılaştırılmalı kararlı hal sürtünme katsayıları.

Kompozisyon	Kararlı hal sürtünme katsayısı
%75 Al-12Si+%25 Al+% 5 B ₄ C	0,37
% 75 Al-12Si+%25 Al+%10 B ₄	0,15
% 100 Al-12Si + %5 B ₄ C	0,15
%100 Al-12Si + %10 B ₄ C	0,15

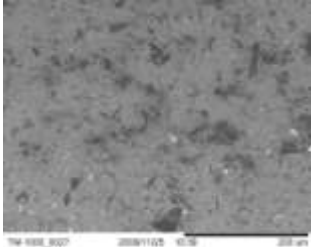
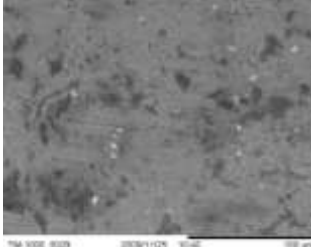
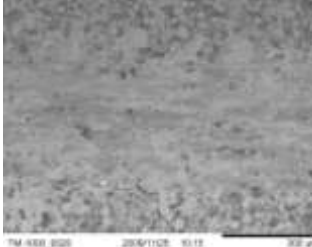
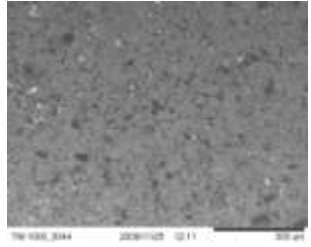
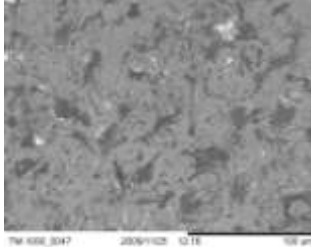
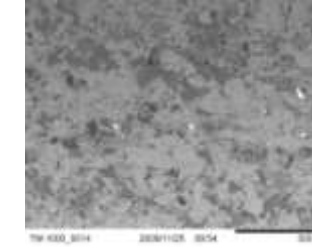
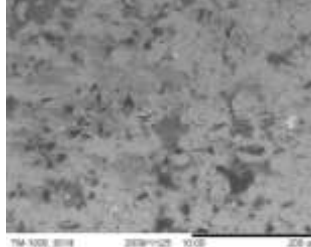
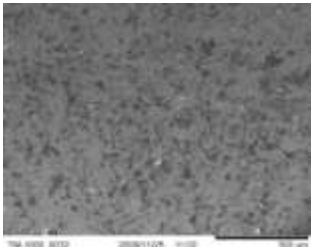
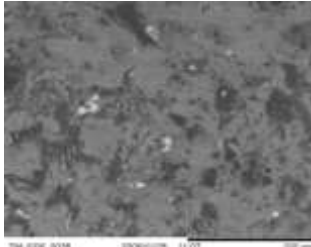
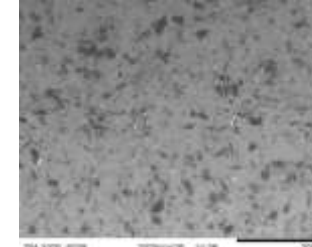
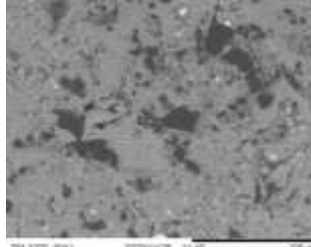
Aşınma sonrası aşındırıcı alümina top izleri Şekil 4.19’ da görülmektedir. Bu görüntülerde de görülüyor ki hava ortamındaki alumina top izlerine göre (Şekil A.5 ve Şekil A.6) alümina topta daha az kirlenme görülmektedir. Bu da aşınma direncinin arttığının başka bir deyişle aşınma oranının düştüğünün göstergesidir.

Aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntülerine bakıldığında (Şekil 4.20), hava ortamındakinin aksine (Şekil 4.14) izlerin belirginliğinin oldukça azaldığı görülmektedir.

Komp.	SU ORTAMINDA
%75 Al-12Si+%25 Al +%5 Bor Karbür	
%75 Al-12Si+%25 Al +%10 Bor Karbür	
%100 Al-12Si +%20 Bor Karbür	

Şekil 4.17 : Aşınma sonrası alümina aşındırıcı top izlerinin optik mikroskop görüntüleri.

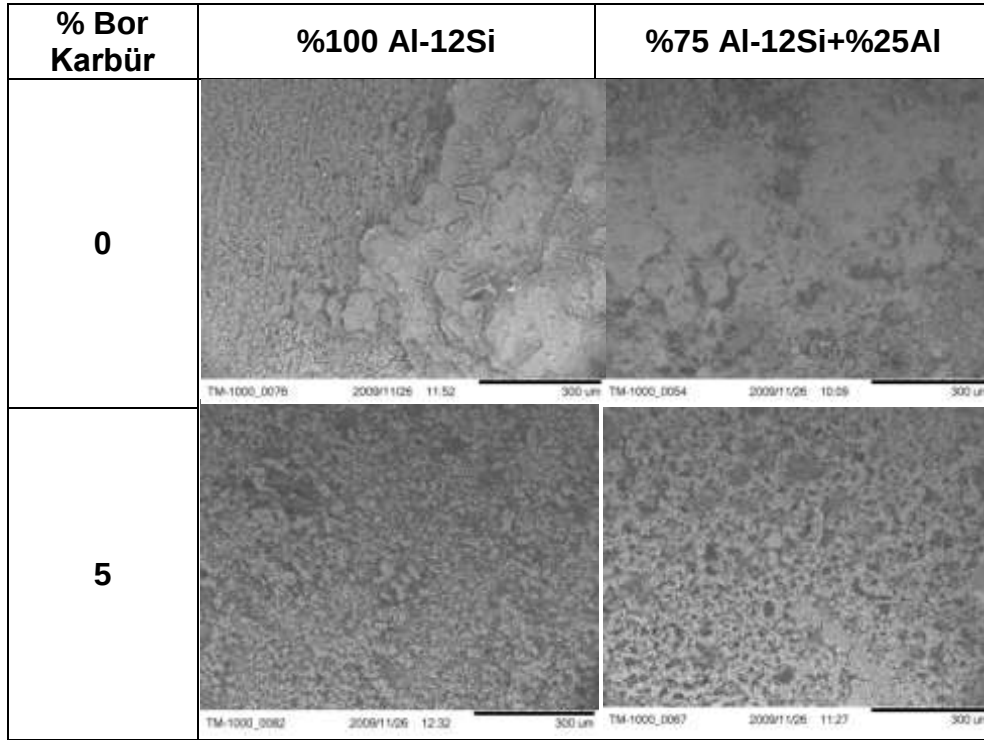
Suda aşınma davranışını özetlemek gerekirse; sulu ortamdaki aşınma davranışı hava ortamındakine paralellik göstermektedir. Bor karbür oranı arttıkça aşınma direncinde bir artış söz konusudur. %100 Al-12Si matrise sahip kompozit kaplamalar daha iyi aşınma direncine sahiptir. Su ortamında aşınma direnci hava ortamındakine kıyasla %65-%70 oranında artmıştır. Sürtünme katsayısında da benzer bir şekilde hava ortamına kıyasla %55-%60 oranında düşme olmuştur. Aşınma top izleri, aşınma izi taramalı elektron mikroskop görüntülerinden de aşınma oranının düştüğü net bir şekilde anlaşılmaktadır.

%B4C	%100 Aluminyum-12 Silisyum		%75 Al-12Si+%25 Aluminyum	
5				
10				
20				

Şekil 4.18 : Aşınma izlerinin küçük ve büyük büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

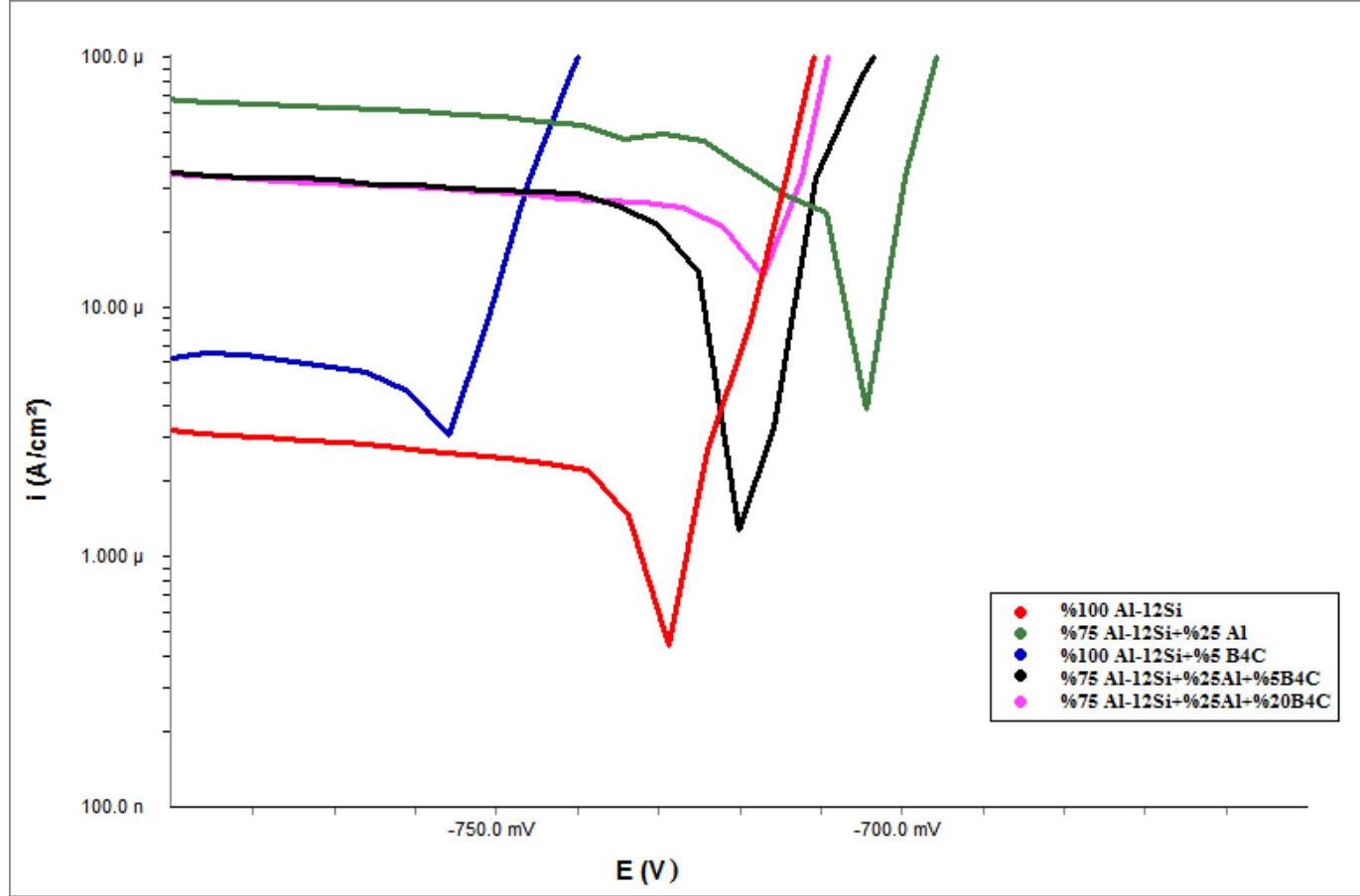
4.3 Korozyon Deneyi

Korozyon deneyi sonrası çekilen taramalı elektron mikroskobu görüntülerine göre (Şekil 4.21) bor karbür takviyesi olmayan kaplamalarda başka bir deyişle matris kaplamalarında iki farklı bölge görülmektedir. Bor karbür ilavesi ile yapılan kaplamalardaki korozyon yüzeylerinde tek çeşit bir yüzey görünümü görülmektedir. Daha iri çukurcuklar oluşmuş dolayısıyla korozyon daha etkin gerçekleşmiştir.



Şekil 4.19 : Korozyon yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.19’ daki taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde ve korozyon deneyi sonrası elde edilen akım yoğunluğu-potansiyel grafiklerinde (Şekil 4.20) bor karbür miktarı arttıkça korozyon direncinin düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 4.20 : Korozyon deneyi sonrası elde edilen E (korozyon potansiyeli)-I (akım yoğunluğu) grafiği.

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hacimce %100 Al-12Si, %75 Al-12Si+%25 Al, %50 Al-12Si+%50 Al, %25 Al-12Si+%75 Al kompozisyonlarındaki dört farklı matris SDGP ile üretilmiş, bu dört matris içerisinde en yüksek performansa sahip %100 Al-12Si ve %75 Al-12Si+%25 Al kompozisyonlarına sahip matris yapılarıdır. Bu iki matrise %5, %10, %20 oranlarında B₄C takviye edilerek 6082 kalite Al altlık üzerine kaplanması hedeflenen kompozit kaplamalar SDGP ile başarılı bir şekilde üretilmiştir.

1. Söz konusu kompozit kaplamalarda, partiküllerin yapıya iyi penetrasyonu sayesinde altlık-kaplama arayüzeyi süresiz bir yapıda ve iyi kalitededir. Partiküllerin altlık malzeme üzerinde plastik deformasyon oluşturma yetisi ile iyi yapışma sağlanabilmiştir.
2. Kaplama öncesi ve sonrası SDGP doğasına aykırı olacak herhangi bir difüzyon, faz dönüşümü, yen ürün oluşumu, kimyasal reaksiyon, oksitlenme..vb gibi olaylar meydana gelmemiştir. Kompozit kaplamalar, püskürtülen tozların tüm özelliklerini muhafaza etmişlerdir.
3. B₄C takviyesi olmadan yapılan sertlik ölçümlerinde Al tozuna Al-12Si eklendikçe sertliğin arttığı görülmüştür. %75 Al-12Si+%25 Al kompozisyonuna sahip yapının sertliği 74 ± 8 Hv_{0,05} iken % 100-Al12Si matrisin sertliği 93 ± 7 Hv_{0,05} dir. Bu matrislere %20 B₄C eklenmesi ile sertlik değerleri sırasıyla 142 ± 18 Hv_{0,05} ve 217 ± 21 Hv_{0,05} olmuştur. En yüksek sertlik değeri %100 Al-12Si matrisli %20 B₄C takviyeli kompozit kaplamada 217 ± 21 değerinde ölçülmüştür. İki matrise de bor karbür ilave edildikçe sertlik artmaktadır. %100 Al-12Si matrise % 20 B₄C takviyesi ile sertlikte yaklaşık %120, %75 Al-12Si+%25 Al matrise %20 B₄C takviyesi ile yaklaşık %200 oranında artış olmuştur
4. Gerek Al-12Si gerek Al-12Si+Al içerisinde B₄C ilavesi sertlik artışına bağlı olarak Al₂O₃ aşındırıcı bilyaya karşı kuru ortam aşınma direncini arttırmıştır. Aşınma direncine %10 B₄C' den daha fazlasının radikal bir etkisi yoktur. Başka bir deyişle aşınma direncinin artışı özellikle 150 Hv_{0,05} kaplama sertliğine kadar

5. geçerlidir. 150 Hv_{0,05} daha yüksek sertlikteki kompozit kaplamalarda aşınma kaybında çok belirgin bir azalma olmamıştır.
6. Bu kritik sertlik değerine (150 Hv_{0,05}) %100 alüminyum – 12 silisyum tozuna yaklaşık % 5 bor karbür veya %75 alüminyum – 12 silisyum + %25 alüminyum toz karışımına yaklaşık % 20 bor karbür ilavesiyle ulaşılabilir. Özellikle aşınma direncini arttırmak amacıyla SDGP yöntemi ile kompozit kaplama üretilmek istenirse, %10 B₄C’ den fazla B₄C ilave etmek gereksiz olacaktır.
7. Aşınma deneylerinin su ortamında yapılması ile aşınma direnci % 65-% 70 oranında artmış, sürtünme katsayısı ise % 55-% 60 oranında düşmüştür. Örneğin %100 Al-12Si matrisli %5 B₄C takviyeli kompozit kaplamanın kuru ortamda aşınma oranı 0.17 iken, sulu ortamda 0,04’ tür. Kararlı hal sürtünme katsayısı da 0,38’ den 0,15’ e düşmüştür. Suda aşınma davranışı kuru ortamla paralellik göstermektedir. Bor karbür oranı arttıkça aşınma direnci artmış olup, kuru ortamdaki gibi %100 Al-12Si matrise sahip olan kompozit kaplamalar daha iyi aşınma direncine sahiptir.
8. Kaplamalarda bor karbür miktarı arttıkça korozyon direnci düşmektedir.

Aşınma direncinde B₄C partiküllerinin etkisi %10’ a kadardır. SDGP yöntemi ile üretilcek kaplamalar aşınma direnci istenen yerlerde kullanılacaksa % 10 oranında bor karbür ilave etmek yeterlidir.

Sulu ortamda yapılan aşınma deney sonuçları hava ortamındaki verilerle kıyaslandığında sulu ortamda aşınma oranı yaklaşık % 70 oranında düşmüştür. Başka bir deyişle aşınma direnci %70 artmıştır. Bu olayın mekanizmasının araştırılması yönünde bazı tahminler ve çalışmalar yapılmış fakat yeterli bulgulara ulaşılamamıştır. Bu mekanizmanın detaylı olarak tanımlanması için olayın ileri teknik analiz yöntemleri ile irdelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<http://www.arl.army.mil>>, alındığı tarih 29.09.2009.
- [2] **Url-2** <<http://www.gordonengland.co.uk/coldspray.htm>>, alındığı tarih 29.09.2009.
- [3] **Papyrin A.**, 2007: Cold Spray Technology, x-xi.
- [4] **Url-3** <<http://www.cgt-gmbh.com/>>, alındığı tarih 29.09.2009.
- [5] **Gilmore D., L., Dykhuizen R., C., Neiser R., A., Roemer T., J. and Smith M., F.**, 1999: “Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process”, Journal of Thermal Spray Technology, 8(4), 576-582.
- [6] **Wu J., H., Fang H., Y., Lee L., H., Yoon S., H. and Kim H., J.**, 2006: “Critical and Maximum Velocities in Kinetic Spraying”, Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, Seattle, Washington, USA.
- [7] **Bartenev S., S., Fedko Y., P. and Grigirov A., I.**, 1982: “Detonation Coatings in Machine Building”, Leningrad: Mashinostroenie (in Russian).
- [8] **Url-4** <<http://www.rusonic.com/appli.htm>>, alındığı tarih 06.10.2009.
- [9] **A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, and A.N. Papyrin**, Method of a Drag Reduction of a blunt-nosed body. Patent of Russian Federation No. 1228579 [in Russian], 1986.
- [10] **A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev and A.N. Papyrin**, J. Appl. Mech. Tech. Phys, Vol.39, No.2, 1998, pp. 318-324
- [11] **A.N. Papyrin , V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, and A.P. Alkhimov**, On the interaction of high speed particles with a substrate under the Cold Spraying, Intern. Thermal Spray Conf. 2002 (ITSC 2002), 2002 (Essen, Germany), Proceedings, pp. 380–384.
- [12] **A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, and V.F. Kosarev**, J. Appl. Mech. Tech. Phys., Vol. 41, No. 2, 2000, pp. 245–250.
- [13] **F.F. Vitman and N.A. Zlatin**, Zh. Tekh. Fiz., No. 8, 1963, pp. 982–989.
- [14] **L.V. Belyakov, F.F. Vitman, and N.A. Zlatin**, Zh. Tekh. Fiz., No. 8, 1963, pp. 990-995.
- [15] **Zlatin N., A., Krasil'shcikov A., P., Mischin G., I. and Popov N., N.**, 1974: Ballistic Facilities And Their Application İn Experimental Research, Nauka, Moscow, Russia.
- [16] **Gardner D., J., McDonnell J., A., M., Collier I.**, 1997: IJIE, Vol.19, No:7 pp:589-602.

- [17] **Li W.-Y., Zhang C., Liao H., Li J., Coddet C.,** Characterization of Cold Sprayed Nickel-Alumina Composite Coating With Relatively Large Nickel-Coated Alumina Powder.
- [18] **Institute of Mining & Metallurgy,** <http://www.kf-bgrimm.com.>), Beijing Maden Ve Metalurji Genel Araştırma Enstitüsü, Çin.
- [19] **Sansoucy, E., Marcoux, P., Ajdelsztajn, L., Jodoin B.,** 2008: Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process
- [20] **Lee, H., Y., Jung, S., H., Lee, S., Y., Ko, K., H.,** 2006: Fabrication Of Cold Sprayed Al-intermetallic Compounds Coatings by Post Annealing, Ajou University, South Korea.
- [21] **Li W.-Y., Zhang C., Guo X., P., Zhang G., Liao H. L., Coddet C.,** 2007: Deposition Characteristics of Al-12Si Alloy Coating Fabricated By Cold Spraying With Relatively Large Particles, LERMPS, Université' de Technologie de Belfort-Montbéliard, France.
- [22] **L. Zhao, K. Bobzin, D. He, J. Zwick, F. Ernst, E. Lugscheider,** Adv. Eng. Mater. 8 (2006) 264–267.
- [23] **J. Wu, J. Yang, H. Fang, S. Yoon, C. Lee,** Appl. Surf. Sci. 252 (2006) 7809–7814.

EKLER

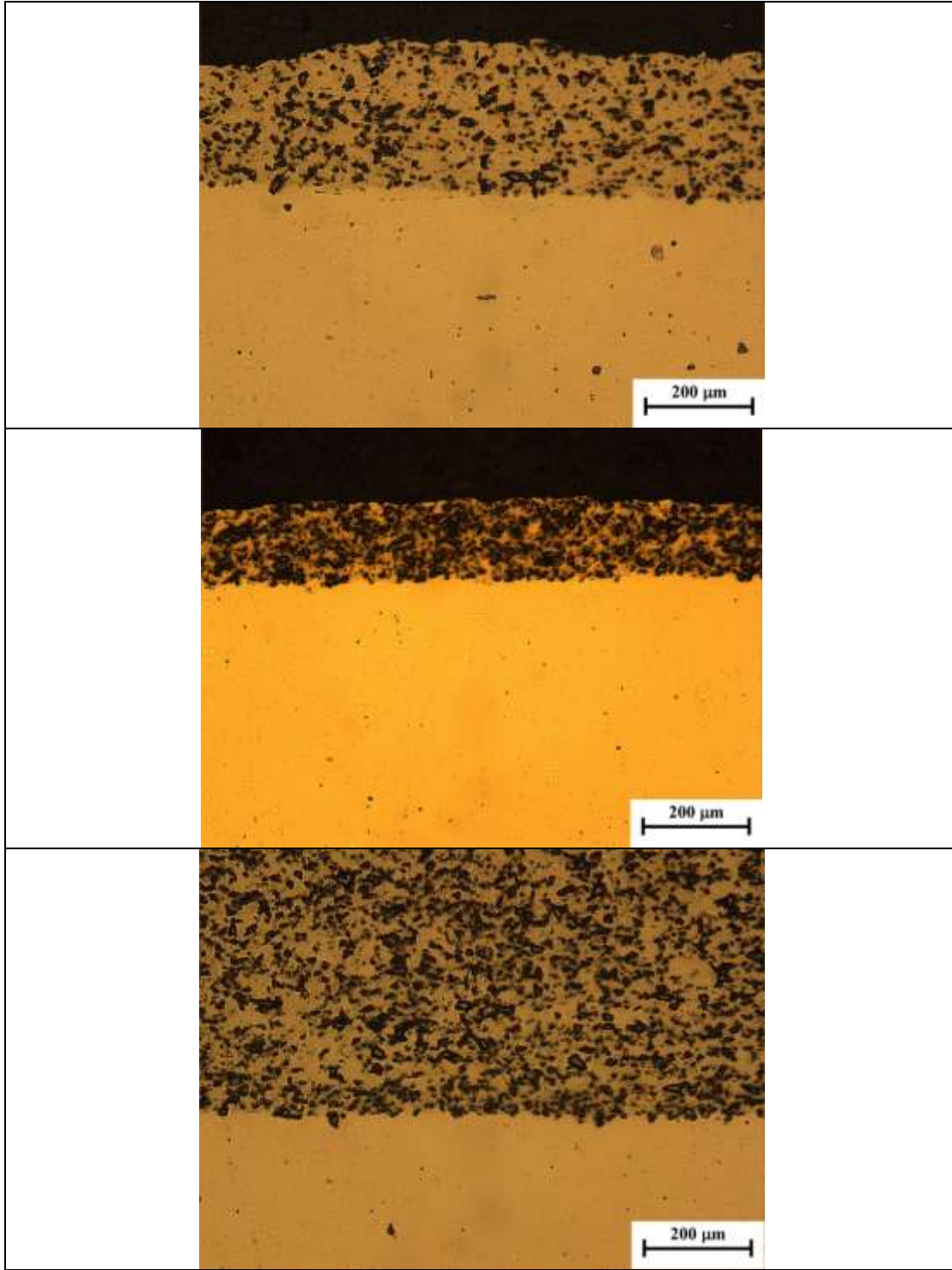
EK A

Çizelge A.1 : Matris kaplamaların ortalama sertlik ve standart sapma değerleri.

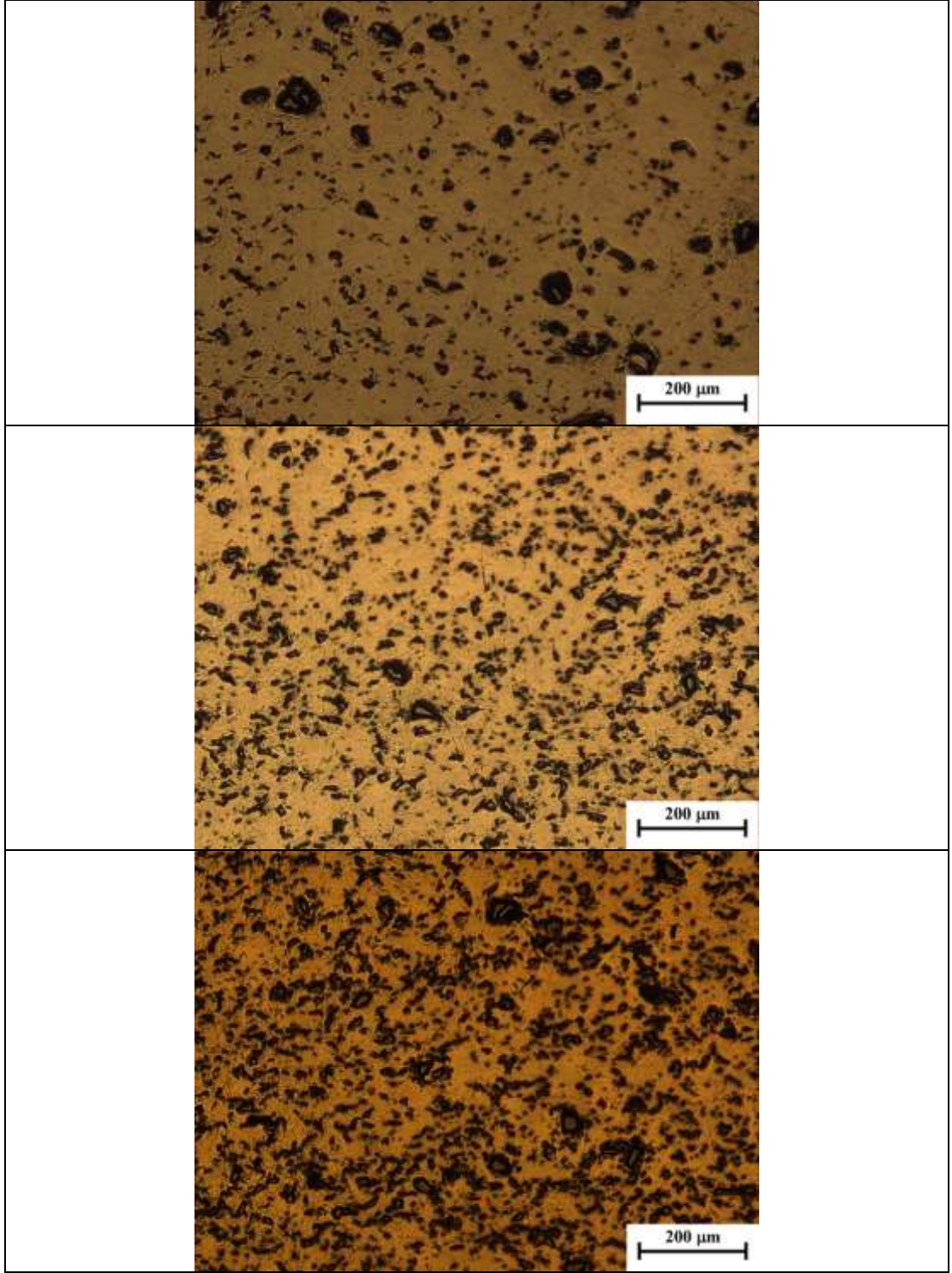
	%75 Al-12Si+%25 Al	%100 Al-12Si
	76,60	111
	68,10	95,7
	53,20	130
	58,00	90,9
	82,20	88,3
	72,40	91,6
	71,00	86,1
	71,10	90,5
	88,50	108,5
	64,90	105,6
ORTALAMA	70,60	99,82
St. Sapma	9,97	13,10

Çizelge A.2 : Değişen bor karbür içeriğine göre sertlik değerleri.

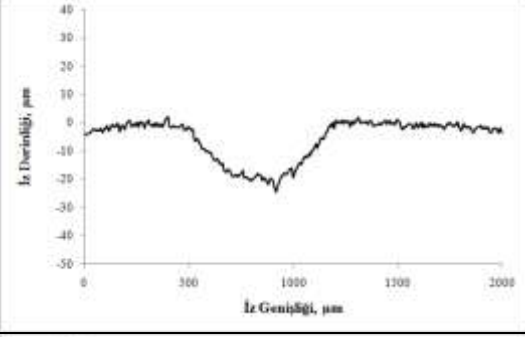
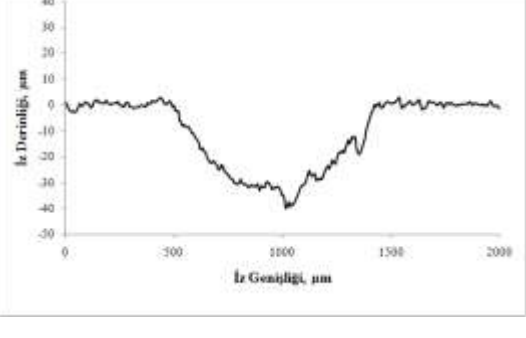
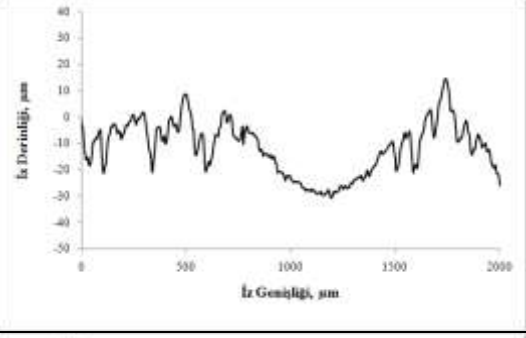
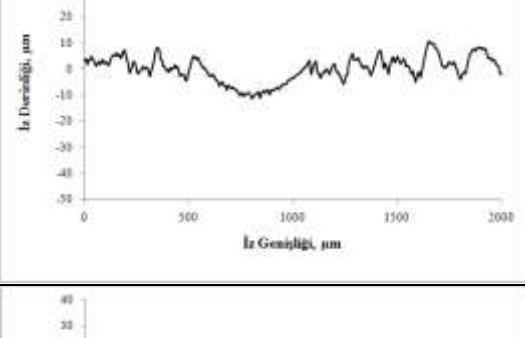
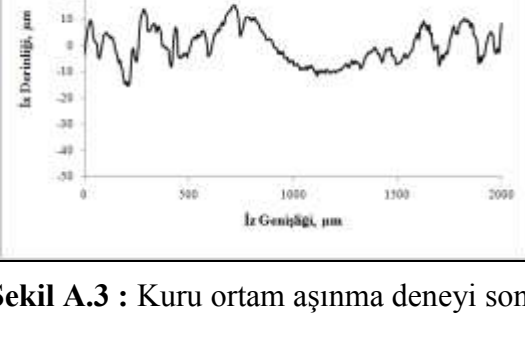
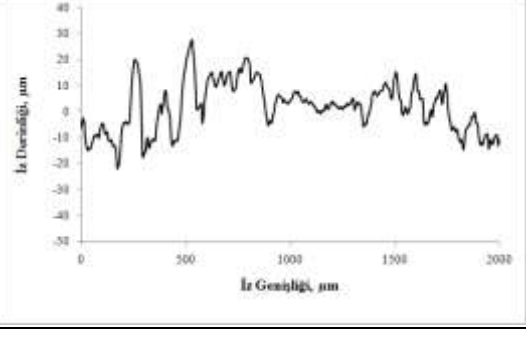
Matris	Bor Karbür içeriği, % hacimce	Sertlik (HV_{0.05})
%100 Alüminyum-12 Silisyum	0	93
	5	162
	10	199
	20	217
%75 Alüminyum-12 Silisyum + %25 Alüminyum	0	74
	5	95
	10	111
	20	142



Şekil A.1 : %100 matrisli sırasıyla %5, %10, %20 B₄C takviyeli kompozit kaplamaların optik mikroskop görüntüleri.



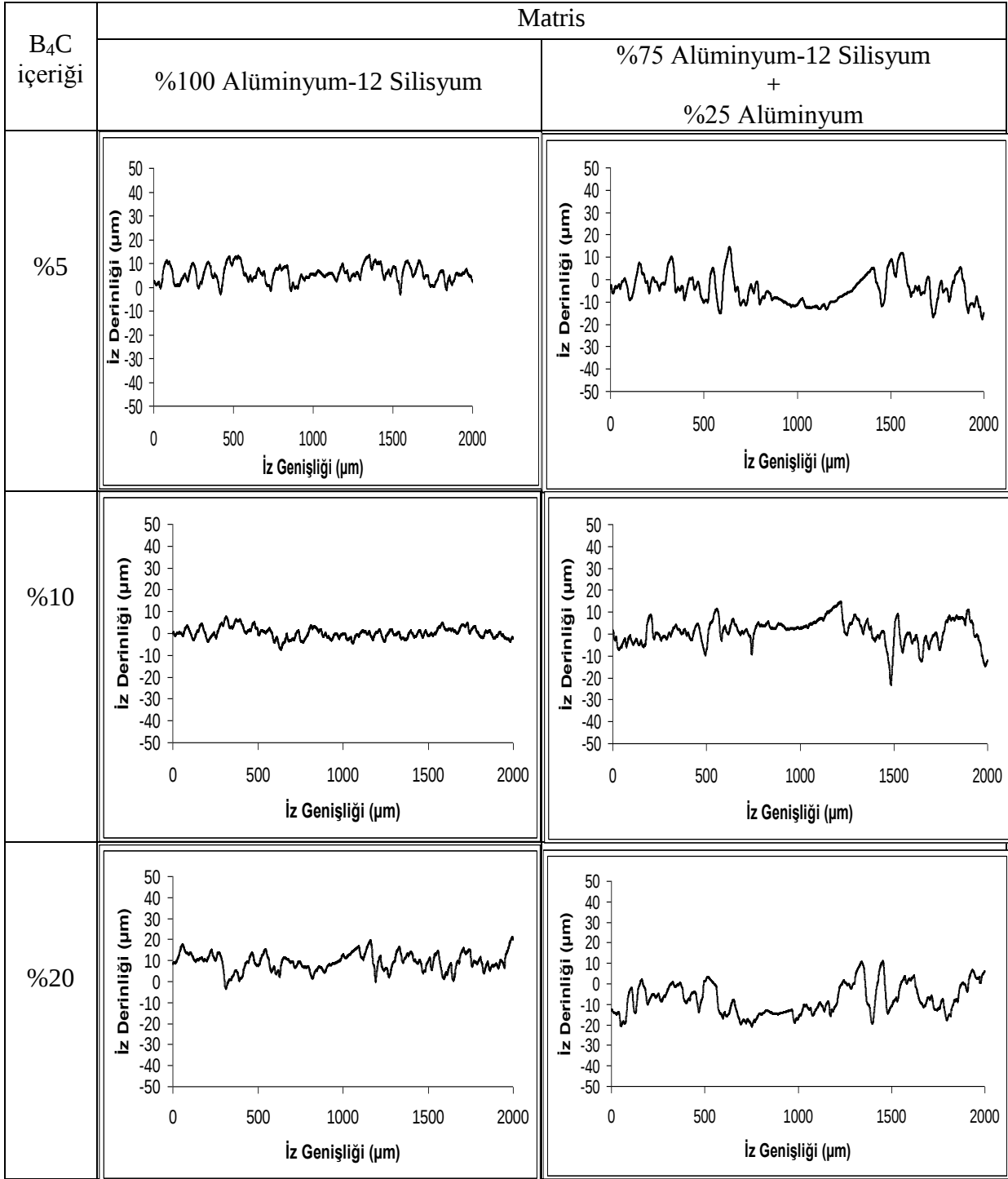
Şekil A.2 : %75 matrisli sırasıyla %5, %10, %20 B₄C takviyeli kompozit kaplamaların optik mikroskop görüntüleri.

B ₄ C içeriği	Matris	
	%100 Alüminyum-12 Silisyum	%75 Alüminyum-12 Silisyum + %25 Alüminyum
%0		
%5		
%10		
%20		

Şekil A.3 : Kuru ortam aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınma profilleri.

Çizelge A.3 : Aşınma profillerinden hesaplanan aşınma izi alanları çizelgesi.

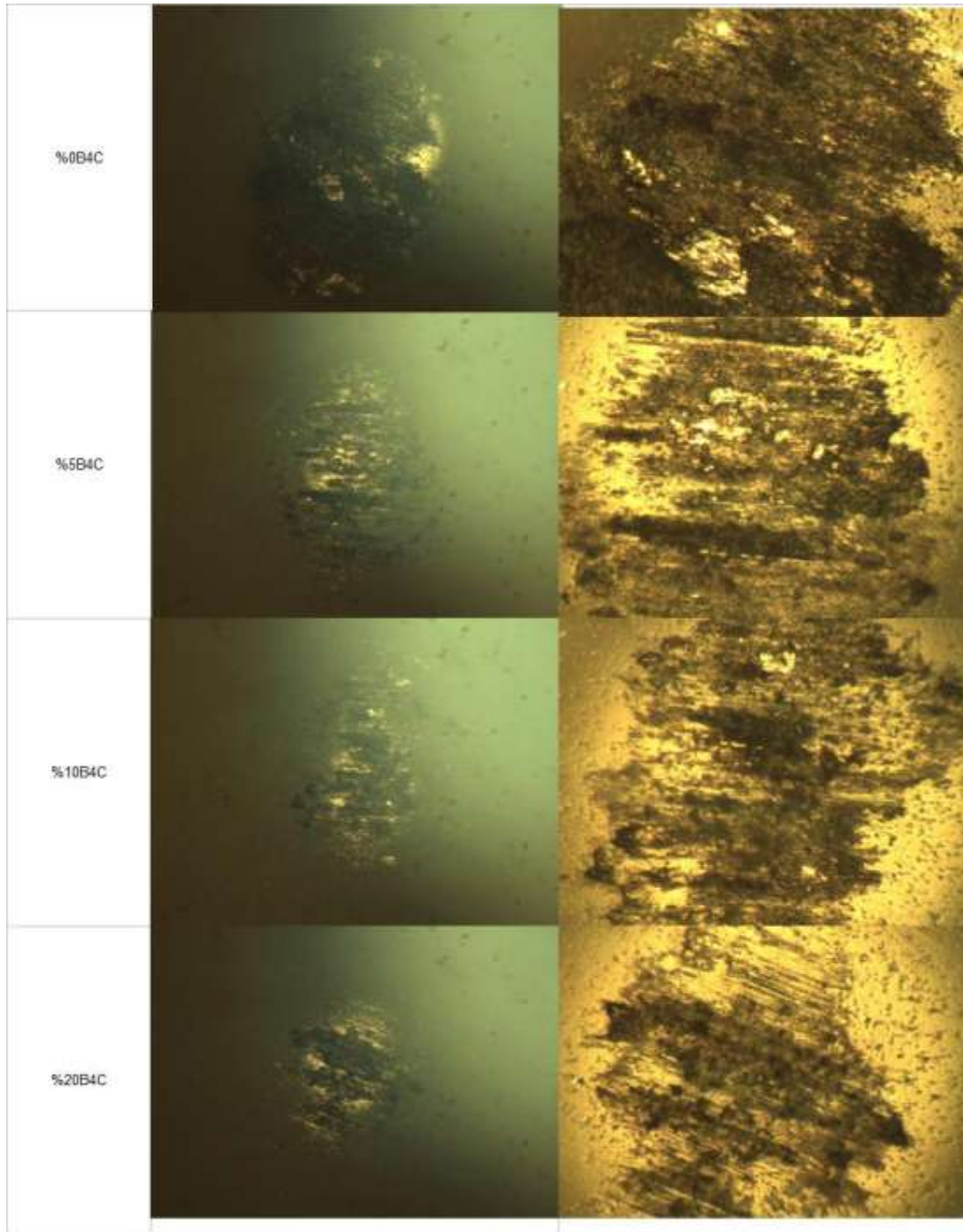
Kompozisyon	A.İzi Genişlik	A.İzi Derinlik	Aşınma İzi Alanı	Ort.Aşınma İzi Alanı	Aşınma Oranı
%75 Al-12Si-%25 Al	948,00	40,75	30340,71645	31296,75022	1
	990,00	43,99	34204,16856		
	972,00	38,44	29345,36565		
%100Al-12Si	775,00	24,38	14839,7056	14009,34077	0,447629248
	775,00	25,25	15369,26031		
	733,00	20,53	11819,05641		
%75 Al-12Si-%25 Al-%5B4C	745,00	15,89	9297,582728	10046,52533	0,321008579
	695,00	18,51	10103,7154		
	760,00	17,99	10738,27785		
%75 Al-12Si-%25 Al-%10B4C	662,00	9,12	4741,794288	7400,084327	0,236448969
	701,00	14,02	7718,908858		
	707,00	17,54	9739,549837		
%75 Al-12Si-%25 Al-%20B4C	627,00	18,64	9179,168247	7437,236279	0,237636056
	616,00	15,07	7290,945399		
	633,00	11,75	5841,59519		
%100Al-12Si-%5B4C	545,00	12,27	5252,075328	3882,796462	0,124063886
	486,00	8,74	3336,088655		
	510,00	7,64	3060,225404		
%100Al-12Si-%10B4C	568,00	12,74	5683,392438	5470,646401	0,174799184
	554,00	12,33	5364,913482		
	563,00	12,13	5363,633283		
%100Al-12Si-%20B4C	677,00	9,42	5008,751123	4840,704714	0,154671162
	674,00	9,51	5034,198024		
	683,00	8,35	4479,164996		



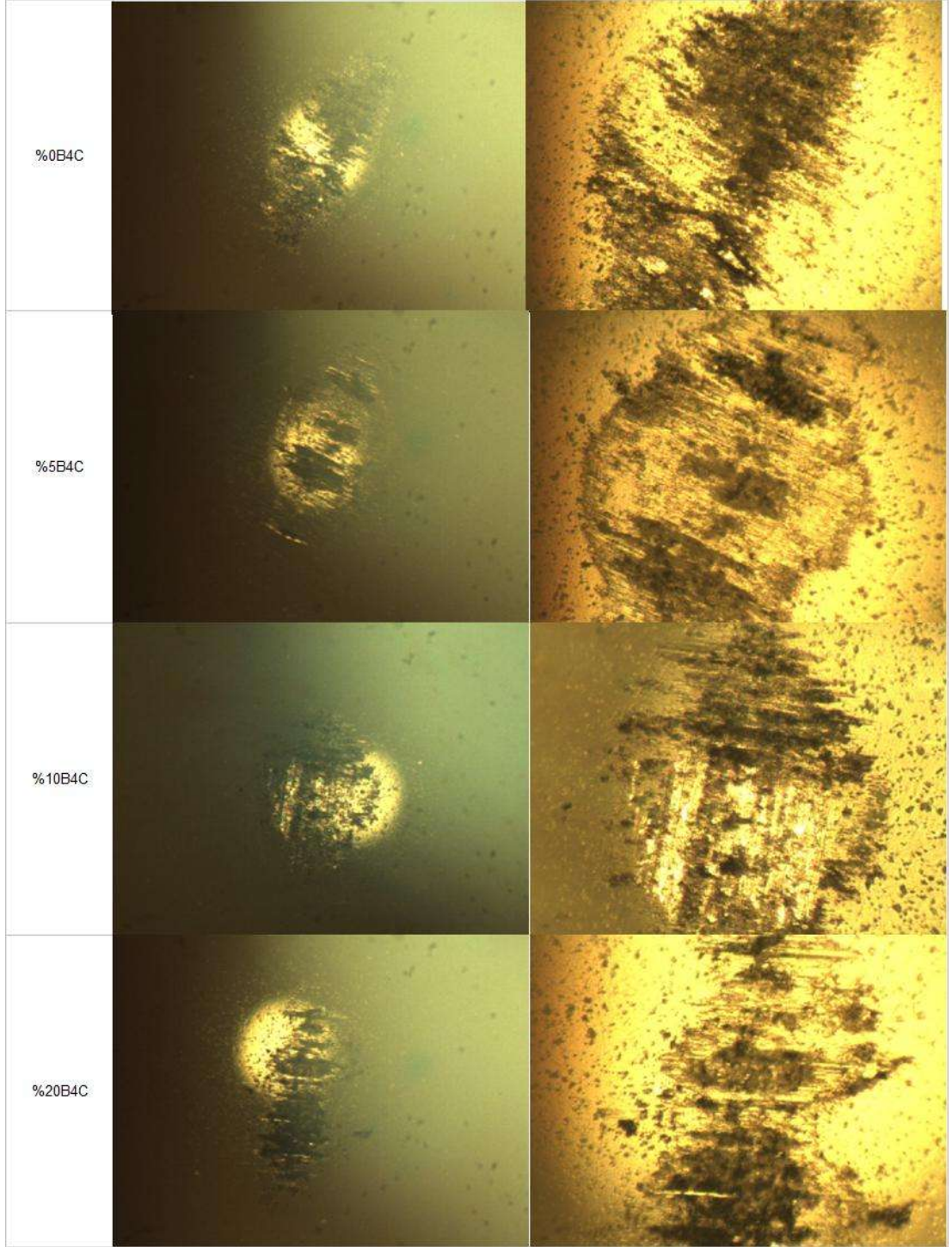
Şekil A.4 : Sulu ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınma izi profilleri.

Çizelge A.4 : Sulu ortam aşınma izi profillerinden hesaplanan aşınma izi değerleri.

%75 Al-12Si-%25 Al-%5B4C	622,00	8,08	3947,22	<u>ORTALAMA</u>	<u>ASINMA KATSAYISI</u>
	557,00	8,85	3871,58		
	660,00	7,88	4084,70	3967,83	0,13
%75 Al-12Si-%25 Al-%10B4C	580,00	3,12	1421,26		
	595,00	3,54	1654,28		
	630,00	5,62	2780,78	1952,11	0,06
%75 Al-12Si-%25 Al-%20B4C	374,00	5,42	1592,06		
	377,00	3,97	1175,50		
	424,00	7,03	2341,05	1702,87	0,05
%100Al-12Si-%5B4C	383,00	4,64	1395,75		
	536,00	7,09	2984,70		
	356,00	4,23	1182,72	1854,39	0,06
%100Al-12Si-%10B4C	425,00	2,82	941,30		
	383,00	5,14	1546,15		
	405,00	3,43	1091,04	1192,83	0,04
%100Al-12Si-%20B4C	412,00	4,30	1391,41		
	230,00	1,25	225,80		
	209,00	1,55	254,43	623,88	0,02



Şekil A.5 : %75 Al-12Si+%25 Al matrisli sırasıyla %5, %10 ve %20 bor karbür takviyeli kompozit kaplamaların aşınma deneyi sonrası elde edilen Al_2O_3 aşındırıcı top izlerinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil A.6 : %100 Al-12Si matrisli sırasıyla %5, %10 ve %20 bor karbür takviyeli kompozit kaplamaların aşınma deneyi sonrası elde edilen Al_2O_3 aşındırıcı top izlerinin optik mikroskop görüntüleri.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Caner SÖNMEZ

Doğum Yeri ve Tarihi: MERSİN-06.10.1984

Lisans Üniversite: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Yaman M., Gaşan H., Sönmez C., 2006: Kompozit Malzemelerin Karşılaştırmalı Üretim Yöntemleri, ESOGÜ Kütüphanesi, Eskişehir,Türkiye.