

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al₁₂Si MATRİSLİ SiC_p TAKVİYELİ KOMPOZİT
KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLMESİ VE SULU ORTAMDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özde DEPREM

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al₁₂Si MATRİSLİ SiC_p TAKVİYELİ KOMPOZİT
KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLMESİ VE SULU ORTAMDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özde DEPREM
506121415**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

AĞUSTOS 2015

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121415 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Özde DEPREM** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Al₁₂Si MATRİSLİ SiC_p TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE SULU ORTAMDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat Baydoğan**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem Atar
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **AĞUSTOS 2015**
Savunma Tarihi : **AĞUSTOS 2015**

Ekrem ve Neriman Kangal'a,

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince benimle değerli bilgi ve deneyimlerini paylaşan, hiçbir şekilde benden desteğini esirgemeyerek çalışmalarımın tamamlanmasında büyük emeği geçen sayın hocam Prof. Dr. Hüseyin Çimenoglu'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında, tüm detaylarda bana yardımcı olan, verdiği emek için minnettar olduğum Arş. Gör. Onur Tazegül'e çok teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarım boyunca yardımlarını eksik etmeyen, Mak. Müh Hilmi Aksoy'a teşekkür ederim.

Tezimin başladığı günden bittiği güne kadar hiçbir konuda benden yardımını, manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan Arş. Gör. Rıdvan Gecü'ye teşekkür ederim.

Bugüne kadar maddi ve manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayarak bana destek olan ve beni bugünlere getiren aileme teşekkür ederim.

Ağustos 2015

Özde Deprem
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemi (SGDP)	3
2.1.1 Yöntemin Tarihçesi.....	3
2.1.2 Yöntemin Avantajları.....	4
2.1.3 Kullanım Alanları	4
2.1.4 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Sistemleri.....	6
2.1.5 Kaplama Oluşumu.....	8
2.1.6 SGDP'nin Diğer Termal Sprey Yöntemleri ile Karşılaştırılması	12
2.1.7 SGDP Tekniğinde Al ₁₂ Si ve SiC _p Tozlarının Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılması	14
2.2 Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	15
2.3 Sinterlenmiş SiC _p 'ün Özellikleri ve Sulu Ortamdaki Davranışları	33
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
3.1 Kaplama	37
3.2 Karakterizasyon Çalışmaları	38
3.3 Aşınma Deneyleri.....	41
3.4 FTIR Analizleri	42
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	45
4.1 Karakterizasyon Sonuçları	45
4.2 Aşınma Deney Sonuçları.....	49
4.3 FTIR Analiz Sonuçları	59
5. SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

CGDS	: Cold gas dynamic spray
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre
HV	: Vickers sertlik
MPa	: Megapascal
µm	: Mikron
N	: Newton
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiC_p	: SiC partikül
SGDP	: Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme
XRD	: X-Işınları difraktometresi

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : İstasyon tipi ve portatif sistemlerinin işlem parametreleri.	8
Çizelge 2.2 : Metalik tozların yüzeye yapışabilmesi için gerekli kritik çarpma hızları	10
Çizelge 3.1 : Kaplama tozlarının hacimce içeriği.....	37
Çizelge 4.1 : Sulu ortamda yapılan aşınma testleri sonucu bulunan sürtünme katsayısı değerleri ve iz alanları	50
Çizelge 4.2 : Sulu ortamda yapılan aşınma testleri sonucu bulunan sürtünme katsayısı değerleri ve iz alanları	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : SGDP kullanım alanları [3].....	4
Şekil 2.2 : İstasyon tipi sistemlerin şematik gösterimi [5].....	6
Şekil 2.3 : Kabin tipi sistemler [5].....	7
Şekil 2.4 : Portatif tip sistemlerin şematik gösterimi [5].....	7
Şekil 2.5 : Portatif tip sistemler [6].....	8
Şekil 2.6 : Soğuk sprey prosesinde kaplama oluşumu [5].....	9
Şekil 2.7 : (a) Al partikülleri (b) 730 m/s (c) 780 m/s (d) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partiküllerinin etkisi [7].....	10
Şekil 2.8 : (a) Lazer saçılma metoduyla çekilen toz yörünge fotoğrafları. Silindir ve Küre gövde çapı yaklaşık 8 mm (a) kama yarığı ve Al parçacıkları (b) silindir ve Al parçacıkları (c) küre ve Al parçacıkları (d) küre ve akrilik cam parçacıkları [1].....	11
Şekil 2.9 : Termal sprey kaplama yöntemlerinin birikme verimi [15].....	13
Şekil 2.10 : Termal sprey kaplama yöntemlerinin oksit ve porozite oranları [15].....	13
Şekil 2.11 : Termal sprey kaplama yöntemlerinin (a) yatırım maliyetlerinin ve (b) giderlerinin karşılaştırılması [15].....	14
Şekil 2.12 : Al ₁₂ Si alaşımının mikroyapısı [17].....	15
Şekil 2.13 : 7075 Al, B ₄ C ve SiCp toz partiküllerinin morfolojileri [18].....	16
Şekil 2.14 : Kompozit kaplamaların kesitlerinden alınan SEM görüntüleri [18].....	18
Şekil 2.15 : Kaplamadaki seramik partikül içeriklerinin, beslenen toz karışımındaki seramik içeriği ile ilişkisi [18].....	19
Şekil 2.16 : Seramik takviyesiz 7075 Al alaşımı ve %20 seramik içerikli kompozit kaplamaların XRD sonuçları [18].....	20
Şekil 2.17 : Kaplamaların içerdikleri seramik partikülüne göre sertlik değişimi [18].....	20
Şekil 2.18 : Alümina aşındırıcı top ve kaplamalarda oluşan aşınma izleri [18].....	22
Şekil 2.19 : Al-Si faz diyagramı [19].....	23
Şekil 2.20 : Al-12Si, yapısal olarak dentritik ötektoid mikro yapısından ve silisyumun düşük sünekliliğinden dolayı kaplama öncesi ve sonrası Al-12Si X-ışını difraksiyon analizi [19].....	24
Şekil 2.21 : 560 °C’de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri [19].....	25
Şekil 2.22 : 560 °C’de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri [19].....	26
Şekil 2.23 : Sıkıştırılmalı dökümle üretilmiş kompozitlerin a) makro ve b) mikro yapıları [20].....	27
Şekil 2.24 : Aşınma Testinde kullanılan ileri geri hareketli aşınma cihazı [20].....	28
Şekil 2.25 : Sıkıştırma dökümle üretilmiş ve T6 ısıtıl işlemi yapılmış 2618 Al alaşım numunelerinin üzerinde su ve hava içerisinde yapılmış aşınma testlerinde oluşan görüntüler [20].....	29

Şekil 2.26 : Aşınma testlerinde kullanılan Al_2O_3 aşındırıcı top üzerinde oluşan aşınma izleri [20].....	30
Şekil 2.27 : Aşınma testlerine bağlı olarak oluşan sürtünme kuvvet değerleri [20].	30
Şekil 2.28 : Matris sertliğinin 4,5 N altında yapılan aşınma testlerindeki a) aşınma hızı ve b) sürtünme katsayısına etkisi [20].....	31
Şekil 2.29 : Matris sertliğinin a) aşınma hızına ve b) 6N'luk yük altında oluşan sürtünme kuvvetine etkisi [20].....	32
Şekil 2.30 : Matris sertliğinin şiddetli yükler altında oluşan aşınma hızına etkisi[20].....	32
Şekil 2.31 : Matris sertliğinin şiddetli yükler altında oluşan sürtünme katsayısına etkisi [20].....	33
Şekil 2.32 : Tribo-kimyasal film tabakası oluşumunun şematik gösterimi [22].	34
Şekil 3.1 : RUSONIC TM markalı soğuk gaz dinamik püskürtme cihazı.....	38
Şekil 3.2 : Philips marka XRD cihazı.....	38
Şekil 3.3 : Leica markalı optik mikroskop.....	39
Şekil 3.4 : Hitachi TM marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu.....	40
Şekil 3.5 : Shimadzu TM marka HVM-2 mikrosertlik ölçüm cihazı.....	40
Şekil 3.6 : TRIBOTECH TM marka salınımlı aşınma cihazı.....	41
Şekil 3.7 : Dektak 6M iğneli yüzey profil cihazı.....	42
Şekil 3.8 : Bruker TM Alpha-T Fourier transform infrared spektrometresi.....	43
Şekil 4.1 : %100 Al ₁₂ Si içerikli numune üzerinden çekilen XRD paternleri	45
Şekil 4.2 : %15 SiC _p -%85 Al-12Si içerikli numune üzerinden çekilem XRD paternleri.....	46
Şekil 4.3 : %30 SiC _p -%70 Al-12Si içerikli numune üzerinden çekilem XRD paternleri.....	47
Şekil 4.4 : Kaplama sonrası alınan optik mikroskop görüntüleri	48
Şekil 4.5 : Kaplanmış numunelerin içerdikleri takviye (SiC _p) oranına bağlı olarak çizilmiş sertlik değerleri	49
Şekil 4.6 : %SiC _p takviye miktarının su ortamındaki farklı aşınma yüklerine göre kararlı haldeki sürtünme katsayısı değerleri.....	52
Şekil 4.7 : Sulu ortamdaki tüm yükler altındaki aşınma hızları.....	53
Şekil 4.8 : % 25 SiC _p takviyeli kompozitlere sulu ve kuru ortamda yapılan aşınma testleri sonucu bulunan sürtünme katsayısı değerleri.....	54
Şekil 4.9 : %SiC _p takviyeli kaplamaların sulu ve kuru ortamdaki aşınma hızları	55
Şekil 4.10 : Sulu ortamda yapılan aşınma deneyi sonrasında Al_2O_3 top üzerinde oluşan aşınma izleri	56
Şekil 4.11 : % 25 SiC _p takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1, 2, 3, 5 N yüklerinde kuru ve sulu ortamda yapılan aşınma testleri sonucunda Al_2O_3 bilya üzerinde oluşan aşınma izleri	57
Şekil 4.12 : % 100 Al ₁₂ Si, % 5 SiC _p , % 10 SiC _p , %15 SiC _p , %20 SiC _p , % 25 SiC _p ve % 30 SiC _p içerikli kompozit kaplamalar üzerine, 1, 2, 3,5 N arası yüklerde sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 1000x büyütmedeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	58
Şekil 4.13 : % 25 SiC _p takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 1000x büyütmedeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	59
Şekil 4.14 : a) %100 Al ₁₂ Si ile kaplanmış numunenin b) % 30 SiC _p kaplı FTIR analizi	60

AH2Si MATRİSLİ SiC_p TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE SULU ORTAMDA TRIBOLOJİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Soğuk gaz dinamik püskürtme (SGDP) yöntemi 1980’li yılların ortalarında Novosibirsk’te bulunan Rus Bilimler Akademisi’nde, Prof. Dr. Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir. Prosesin keşfedilmesinden sonra, son yıllarda prosesle ilgili büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Soğuk sprej prosesinde, termal sprej proseslerinden farklı olarak; ergime olmadan parçacıkların katı halde yüksek hız ve düşük sıcaklıkta püskürtülerek yoğun kaplamalar elde edilmesi mümkün olmaktadır. SGDP’nin, diğer termal sprej kaplamalarına göre çok daha fazla avantajı bulunmaktadır. İstenmeyen faz ve oksidasyon oluşmaması, kaplamada veya kaplanan altlık malzemenin yapısında kaplama sonrası herhangi bir değişim görülmemesi, yüksek sertlikte, yoğun ve kompakt kaplamaların elde edilebilmesi, altlık ve kaplama malzemesinin farklı malzeme grubunda olacak şekilde seçilebilmesi, yüksek hızda kaplama yapılabilmesi ve bunun sonucunda birikme veriminin artması, kaplama sırasında çok yüksek sıcaklıklarda çalışılmaması ve altlık malzemede çok düşük sıcaklık artışı görülmesi, yüksek sıcaklıklardaki kaplamalarda kullanılan gazlardan dolayı meydana gelen radyasyon, patlayıcı gaz vb. tehlikeli koşulların bulunmaması gibi çok çeşitli avantajları söz konusudur. Kaplamalarda oksit, porozite ve süreksizlikler yok denecek kadar az seviyelerde oluşmaktadır.

SGDP ile verimli kaplamalar elde edilebilmesi, metal matrisli kompozit kaplama oluşturulmasında da bu yöntemin kullanımını teşvik etmiştir. Günümüzde, SGDP yöntemi, oldukça güvenilir ve çevre dostu bir teknoloji olmuştur ve bu özelliği, kaplamanın endüstriyel alanda kullanımlarına dair birçok fırsat sunmaktadır. SGDP prosesi ile, metal matrisli kaplamalarda oldukça yüksek birikme hızına ve yapışma mukavemetine ulaşılabilmektedir. SGDP yönteminin sunduğu fırsatlar sayesinde, uygun parametreler varlığında malzemelerin tribolojik ortamlara uygun hale getirilebilmesi ve aşınma direncinin artırılması mümkündür.

Yüksek sürtünme ve aşınma altındaki tribolojik ortamlarda, hareket yüzeylerinin birbirinden ayrılabilmesi için yağlayıcı kullanılmaktadır. Yağlayıcı tabaka sayesinde, yüzeylerin birbirine doğrudan teması önlenir ve böylece aşınmanın önüne geçilir.

Aşınma ortamlarında yağlayıcı olarak genellikle sentetik yağlar tercih edilmektedir. Bu tür ortamlarda sentetik yağların kullanılması, yağların işlenmesi sonucu açığa çıkan atıkların çevreye zarar verecek şekilde sahada boşaltılması veya yenisi ile değiştirilmesi, depolanması, doğrudan veya dolaylı bir biçimde yüzeysel sular ile yeraltı suyuna, denizlere tasınması hem su, hem toprak, hem de hava kirliliğine neden olur. Yağın yukarıda belirtilen çevreye zararlarından ve yanıcı özelliğinden dolayı, aşınma ortamlarında yağlayıcı olarak su kullanılması oldukça kullanışlıdır. Metallerin su ile olası herhangi bir pas vb. gibi istenmeyen tepkimelerin oluşmaması için tribolojik ortamlarda su ile beraber seramikler kullanılabilir. Seramiklerin sulu aşınma ortamlarında sağladıkları yağlayıcı etki ile ilgili patentlere göre; seramikler su ile tepkimeye girip aşınma yüzeylerinde film tabakası oluşturmaktadır. Bu film tabakası sayesinde aşınma yüzeylerinin doğrudan teması önlenmiş olur.

Bu yüksek lisans tezinde, SGDP yöntemi kullanılarak; homojen, süreksizlik ve boşluklu bir yapı göstermeyen kompozit kaplamaların elde edilmesi, takviye

malzemesi olarak SiC partikül kullanılarak kaplamaların sertliğinin ve aşınma direncinin artması amaçlanmıştır. Hacimce farklı oranlarda SiC_p kullanılarak, kaplamalardaki SiC_p oranının kaplamaların sertliği, aşınma hızı, alanına ve sürtünme katsayısındaki etkisi gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Aşınma testleri sulu ve kuru ortamda yapılarak, SiC_p takviye malzemesinin su ortamındaki yağlayıcı etkisi analiz edilmesi de amaçlanmıştır.

Bu çalışmada belirtilen hedef ve amaçlar doğrultusunda, Al 1050 altlık malzeme üzerine SGDP tekniği ile kompozit kaplamalar elde edilmiştir. Besleme tozları 6 bar basınçta ve taşıyıcı gaz hava kullanılarak püskürtülmüştür. Besleme tozu olarak Al12Si tozu matris malzemesi ve SiC_p tozu takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaplama tozları hacimce %100 Al12Si, %5SiC_p-%95 Al12Si, ,%10SiC_p-%90 Al12Si, %15SiC_p-%85 Al12Si, %20SiC_p-%80 Al12Si, %25SiC_p-%75 Al12Si, %30SiC_p-%70 Al12Si oranlarında kullanılmıştır. Hacimce farklı oranlardaki matris ve takviye malzemesi ile kaplanan numuneler, optik ve taramalı elektron mikroskobu ile mikroskobik incelemeler, X ışınları difraksiyon analizi, sertlik ölçümleri, sulu ve kuru ortamda ileri-geri hareketli aşınma testi cihazında yapılan aşınma testleri ve FTIR ile karakterize edilmiştir. Tüm kaplamalar 1, 2, 3 ve 5 N yükler altında su içerisinde aşındırılmış, % 25 SiC_p takviyeli kaplama aynı zamanda kuru ortamda aşındırılmıştır.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

Matris olarak kullanılan Al12Si ve takviye malzemesi olarak kullanılan SiC_p'lerin oluşturduğu kaplama, Al 1050 altlığa uyumlu bir şekilde bağlanabilmiştir. Mikroskopik analizler sonucunda, kaplamalarda ve kaplama-altlık arayüzeyinde herhangi bir süreksizlik, boşluk veya porozite gözükmediği ortaya çıkmıştır.

Sertlik deneyleri sonucunda bulunan mikrosertlik değerleri, kaplamaların hacimce içerdikleri SiC_p'ler üzerinden karşılaştırılmış ve kaplamaların içerdikleri % SiC_p takviyesi arttıkça sertlik oranında artış saptanmıştır.

Su içerisinde yapılan aşınma deneylerinde kaplamanın içerdiği SiC_p takviye oranı ile doğru orantılı olarak, sürtünme katsayısı değerlerinin ve aşınma alanlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Kuru ortamdaki aşınma deneylerinde sürtünme katsayı değerleri ve oluşan aşınma alanları daha yüksek değerde bulunmuştur.

SiC_p takviyeli numunelerin sulu ortamda yapılan aşınma deneylerinde, SiC_p'ün su ile oluşturduğu tepkime sayesinde yağlayıcı etkisi gözlemlenmiştir. Suyun yağlayıcı etkisi nedeniyle, % 25 SiC_p içeren kaplamada sulu ortamda kuru ortama nazaran daha düşük aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

PRODUCTION OF AL₁₂Si MATRIX WITH SiC_p REINFORCED COMPOSITE COATINGS BY COLD GAS DYNAMIC SPRAY COATING METHOD AND INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF THE COATINGS IN WATER

SUMMARY

The Cold gas dynamic spray (CGDS) coating method was first discovered in mid of 1980s at the Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences in Novosibirsk by Dr. Anatolii Papyrin and his colleagues. The main difference of cold gas dynamic spray method from the other thermal spray coatings is; the coating powder particles do not melt during the coating process and can be coated with supersonic velocity at low temperature, therefore it is possible to obtain intensive coating with cold gas dynamic spray coatings. Cold gas dynamic cold spray can be achieved with station or portable type coating machines. Main differences of these systems are; gas pressure they use and coating powder flow rate during coating process. Portable systems are used manually and controlled by operator, while station types of machines are connected by robotic systems.

CGDS method provides many benefits in comparison to the other thermal spray coating types, such as avoidance of undesirable phases, oxidation and fluctuation in coated substrate material or in coatings; possibility to select and use different type of substrate and coating materials; increase of deposition efficiency as a result of coatings produced with high speed. It also prevents radiation, explosive gas generated from high temperature and decreases oxides, porosity and discontinuity to almost non-existing amount, in the case of coating in high temperature when temperature of substrate materials are likely to rise at very low level. As a result of above mentioned advantageous of the cold gas dynamic spray coating, it has a big utilization in the industry such as; automotive, aerospace, manufacturing, glass, nuclear, Electronics Energy, Medical, Metal, Agricultural Chemical, Construction, Fishery, Food, Furniture, Mold and tooling repair, Forestry, Marine, Mining, Oil and Gas, Paper, Water treatment.

Due to the fact that efficient coatings could be formed with cold dynamic gas spray processes, this method is promoted to be used in production of metal matrix composites. Aluminium composite coating processes are likely to have some complexities because of its melting rate, reaction of melted Aluminium and probabilities of ceramic particles, therefore it is difficult to produce homogeneous coatings with thermal spray coatings. CGDS method can be achieved efficiently, eliminating other potential problematic process results.

Today, CGDS method is very reliable and environment friendly coating technology, this contributes many opportunities to be used in industrial areas. Through the CGDS process, a high level of deposition velocity and bond strength can be achieved. Despite these benefits of the method, some undesirable results such as; oxides, porosity and discontinuity occur with very little amounts. These coating processes are studied in room temperature (without higher temperatures); so it is called cold gas dynamic spray coating. In CGDS processes, metallic powder particles accelerated rapidly and the coating can be formed through the deformation ability of powder particles. It is possible to increase wear resistance of coatings and prepare them to tribo-systems by using CGDS with suitable parameters.

In tribo-systems, where high friction and wear are undesirable, lubricant usage is necessary. The idea of lubrication involves the separation of moving surfaces by a lubricant film. In these systems, generally synthetic oils are preferred to be use as lubricants. However, as a result of processing of the oils during discharging and storage leads to water, soil and air pollution directly by transferring ground water. Thus, it harms to the natural environment. Because of the fact that oils have these hazardous effects to environment and in the lubrication of sliding areas are required to be fire-resistant, water can be used as lubricant in these systems. Water can eliminate detrimental effects of oils which are summarized above. When metal is used to to be operated in environments in which water is present, the problem of rusting occurs, so ceramic materials which have no danger of rusting are suitable for these kinds of applications. According to the patents related water lubricity effect of seramics, they create a thin film on to wear surfaces by their reaction with water. Because of this thin films, direct contacts of wear surfaces can be eliminated.

SiC_p has unique properties such as; low density, high hardness and elasticity modulus, chemical inertness, thermal stability which leads it to be use in tribological systems. Through these properties of SiC_p, it can be highly use in valve components, piston rings, mechanical seals, etc.

In this master study, it is aimed to obtain homogeneous non-porous structured composite coatings with no discontinuity, by utilizing cold dynamic gas spray method and reinforcement with SiC_p in the Al₁₂Si matrix of coating powders, it is intended to get more hardness and wear resistance of the coatings. Objective of using different volumes of SiC_p reinforcement was to analyze ratio of SiC_p effect on the hardness, wear rates, wear areas and friction coefficients of the coated samples. Wear tests were realized both in water and air conditions, so it was aimed to investigate lubricity effect of SiC_p materials in water and compare both conditions in terms of the test results.

In the direction of these aims, CGDS method was used in order to produce composite coatings. Feedstocks were prepared with 100 % Al₁₂Si , 5 vol. % SiC_p +95 vol. Al₁₂Si, 10 vol. % SiC_p + 90 vol. Al₁₂Si, 15 vol. % SiC_p + 85 vol. Al₁₂Si, 20 vol. % SiC_p + 80 vol. Al₁₂Si, 25 vol. % SiC_p + 75 vol. Al₁₂Si, 30 vol. % SiC_p + 70 vol. Al₁₂Si were deposited on 1050 Aluminium substrate. During the coating, air was used in the conditions of 6 bar pressure as process gas. Coating powders were preferred to be used with different volumes in order to analyze effect of reinforcement material SiC_p in the coatings.

Characterization of the coatings were analyzed with microscopic investigations, X-Ray diffraction, microhardness measurements, Scanning electron microscope, wear tests and FTIR measurements. Wear tests were conducted in air and in distilled water against alumina ball under loads of 1, 2, 3 and 5 N on a reciprocating wear tester at room temperature. For all coated samples, wear tests were realized in water. 25 SiC_p % coated samples were tested in air conditions, as well.

Conducted test results were summarized as follows;

Al₁₂Si particles which were used as matrix and SiC_p particles which were used as reinforcement materials were bonded to Al 1050 substrate coherently. As a result of microscopic analysis, any discontinuity, spaces and porosity were not observed in the coated samples.

Microvickers values which were found after hardness tests, were compared in terms of ratio of SiC_p % involvement of coatings. Results show that, while the composition of the SiC_p materials increased, the microhardness values of the coated samples were increased, as well.

As the SiC_p involvement increased in the composition of the coatings, friction coefficients and wear areas of coated samples were decreased. In air conditions, it was resulted that; friction coefficients and wear areas were higher than the water test conditions.

As a result of wear tests of SiC_p reinforced coatings in water, lubricity effect was observed due to reaction of the SiC_p with water. Because of the lubricity, wear resistance of coatings in water tested are higher than the 25 % vol. SiC_p involved coatings tested in air conditions. The findings of the wear tests revealed potentiality of water to be used as a lubricant for the SiC_p reinforced composite coatings.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, Al₁₂Si matrisli SiC_p takviyeli kompozit kaplamalar SGDP ile elde edilmiştir. Kaplamalar yapılırken matris ve takviye oranları hacimce farklı oranlarda karıştırılmış ve altlık malzeme olarak Al 1050 alaşımı kullanılmıştır.

Karakterizasyon çalışmaları çerçevesinde, mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve FTIR analizleri yapılmıştır. Bununla birlikte sulu ve kuru ortamda, ileri-geri hareketli aşınma test cihazında 1, 2, 3 ve 5 N yükler altında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

SGDP, metalik toz parçacıkların çok yüksek hızla ivmelendirilerek yüzeye çarpmaları sonucunda parçacıkların deformasyon kabiliyetine göre yüzeyde biriktiği kaplama yöntemidir.

Kaplamanın temeli, yüksek basınçlı sıkıştırılmış gaz içerisinde depolanan enerjinin, ince toz partikülleri (5-100 µm) yüksek hızlarda (500-1500 m/s) püskürtmek için kullanılmasıdır. Sıkıştırılan gaz, kurutucu üniteden geçip kaplama cihazının tabancasına iletilir, tabancanın ucundaki nozülünden çok yüksek hızla dışarı çıkar. Aynı zamanda, soğuk gaz dinamik püskürtme cihazının toz besleme bölgesinden tabancaya iletilen tozlar yüksek hızdaki hava akışı ile birleşerek bir kaplama jeti oluşturur. Bu kaplama jetini oluşturan tozlar yüzeye hızlıca çarpmalarından dolayı plastik deformasyona sebep olur ve malzemeye fiziksel olarak bağlanırlar.

Bu yöntemde kaplama, yüksek sıcaklıklara çıkılmadan oda sıcaklığında gerçekleştiğinden soğuk olarak nitelendirilmiştir. Kaplama esnasında herhangi bir difüzyon, kaplamaların kimyasal bozunumu, oksitlenme, buharlaşma, ergime, kristalleşme, istenmeyen gazların açığa çıkması gibi sorunlar meydana gelmemektedir. SGDP prensibi temel olarak termal spreye benzemektedir ancak termal spreydeki gibi yüksek sıcaklık uygulanmasına gerek olmadığından oksitlenme ve başka fazların oluşumu gibi bir problem ortaya çıkmaz. Kaplamalardaki önemli sorunlardan biri oksitlenmedir. Bu kaplamadaki en büyük avantajlardan biri kaplamanın homojen, az boşluklu ve yüksek bağ mukavemetine sahip olmasıdır. Bu

tür verimli özelliklerinden dolayı, SGDP prosesi, metal matrisli kompozit kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu kaplama sayesinde, doğru parametreler altında, metal matrisli kompozitler aşınma dirençleri artırılarak tribolojik ortamlara uygun hale getirilebilmektedir. Tribolojik ortamlarda, hareket kolaylığı veya hareket yüzeylerinin birbirinden ayrılabilmesi için yağlayıcı kullanılmaktadır. Tercih edilen sentetik yağlar genellikle kullanım, işlenme ve depolanma, boşaltım sırasında çevreye zarar vermektedir. Yağların çevreye verdiği zararlardan dolayı, aşınma ortamlarında yağlayıcı olarak alternatif olarak su kullanılabilir. Yapılan patent çalışmaları, aşınma yüzeylerinde bulunan seramiklerin su ile girdiği tepkime sayesinde bir film tabakası oluşturduğu; bu film tabakası da aynı yağlar gibi hareket yüzeylerinin birbirlerinden ayrılabilmesini sağlamaktadır.

Alüminyum 1050 altlık malzeme üzerine matris malzemesi olarak Al₁₂Si ve takviye malzemesi olarak SiC_p kullanılarak SGDP tekniği ile elde edilen kaplamalar homojen, süreksizlik ve porozite göstermeyen bir yapıda olup; kaplamalara SiC_p takviyesi sayesinde kaplamaların aşınma dayanımının artması, sürtünme kuvvetlerinin azalması ve sertlik değerlerinin artması hedeflenmiştir. Aşınma testleri sulu ve kuru ortamlarda yapılmış; sulu ortamda SiC_p'ün temas yüzeylerinde oluşturduğu ince filmlerin sağladığı yağlayıcı etki ve bu etkinin aşınma direncine etkisi gözlemlenmek amaçlanmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemi (SGDP)

2.1.1 Yöntemin Tarihçesi

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ilk defa, 1980’li yılların ortalarında Novosibirsk Rus Bilimler Akademisi Teorik ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü’nde, Profesör Anatolii Papyrin ve Arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, bir hava akımı içinde ses hızından daha yüksek hızlarda iki fazlı (gaz+kıta parçacıklar) akış çalışmalarının modellenmesi sırasında ortaya çıkmıştır. Bahsi geçen bilim adamları bu yöntemle birçok farklı malzeme üzerine metal, metal alaşımları ve kompozit kaplamaları gibi birbirinden farklı kaplamaları oluşturabilmiş, soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinin birçok alanda kullanılabildiğini kanıtlamışlardır.

1980’li yıllarda SGDP ile ilgili farklı tartışmalar ortaya çıkmıştır. Bir kısım bilim adamı, kaplamanın meydana gelebilmesi için kaplama jetini oluşturan partiküllerin yüzeye çarparken ergime noktası Sıcaklığında veya bu Sıcaklığa yakın olması gerektiğini savunmuşlardır. Bir kısım bilim adamı ise herhangi bir fiziksel değişim meydana gelmediğini belirtmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar sonucunda; kaplamayı oluşturan partiküllerin ergime SiC paklıklarının altında olduğu ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla fiziksel bir değişimden söz edilemez.

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, ABD Ordu Araştırma Laboratuvarı, Delphi Araştırma Laboratuvarı, Almanya’da Federal Silahlı Kuvvetler Üniversitesi, Avrupa Hava Savunma ve Uzay Araştırma Kurumu, Linde AG Soğuk Gaz Teknolojileri, Siemens, İngiltere’de Cambridge, Nottingham ve Liverpool Üniversiteleri’nde, Yasaki Avrupa ve BOC Gaz Şirketlerinde, Japonya’daki Shinshu Üniversitesi ve Plasma Gigen Şirketlerinde, Kanada’da Windsor Üniversitesi ve Ulusal Araştırma Kurulu’nda Avustralya’da CSIRO,

Brezilya’da Mahle Metal, Güney Kore, Çin ve Hindistan ve birçok ülkede daha soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği üzerine çalışmalar devam etmektedir [1].

2.1.2 Yöntemin Avantajları

Soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminin, muadil termal sprey kaplama yöntemlerine nazaran oldukça fazla avantajı bulunmaktadır. İstenmeyen faz ve oksidasyon oluşmaması, kaplamada veya kaplanan altlık malzemenin yapısında kaplama sonrası herhangi bir değişim görünmemesi, yüksek sertlikte, yoğun ve kompakt kaplamaların elde edilebilmesi, altlık ve kaplama malzemesinin farklı malzeme grubunda olacak şekilde seçilebilmesi, yüksek hızda kaplama yapılabilmesi ve bunun sonucunda birikme veriminin artması, kaplama sırasında çok yüksek sıcaklıklarda çalışılmaması ve altlık malzemede çok düşük sıcaklık artışı görülmesi, yüksek sıcaklıklardaki kaplamalarda kullanılan gazlardan dolayı meydana gelen radyasyon, patlayıcı gaz gibi tehlikeli koşulların bulunmaması gibi çok çeşitli avantajları söz konusudur [2].

SGDP yönteminin sayılan bu avantajlarından dolayı endüstride de büyük bir kullanım payına sahiptir. Bir sonraki bölümde kullanım alanları belirtilmiştir.

2.1.3 Kullanım Alanları

Soğuk gaz dinamik püskürtme metodu yukarıda sayılan özelliklerinden dolayı hem ticari hem de endüstriyel uygulamalarda çok geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Şekil 2.1’de SGDP’nin kullanım alanlarına yönelik şematik bir gösterim verilmiştir.



Şekil 2.1 : SGDP kullanım alanları [3].

- Otomotiv sektöründe; düşük poroziyeli sprey lehimleme parçalarında, motor bakım ve kişiye özel üretimlerde, alüminyum direksiyonların onarımında,
- Havacılık sektöründe; yüzey onarımında (oyukların, alüminyum kaplı sacların), korozyon direncini arttırmak amacıyla, iniş destek ünitelerinin onarımında
- Üretimde; kalıp ve maça onarımında, plastik enjeksiyon kalıp onarımında, termoform kalıp onarımında, kalıp üretiminde, elektroform kalıp onarımında,
- Cam sektöründe; yoğunlaşmayı önlemek amacıyla, artistik uygulamalarda,
- Nükleer sektöründe; korozyon sonrası onarım, konteynırlarda sızdırmazlık ve basınç tanklarında sızdırmazlık amacıyla, pompa onarımında, elektriksel devrelerin bağlantı noktalarında, jeneratör onarımında,
- Elektronik sektöründe; sensörlerde, ısı soğutucularda, bağlantı için seramik ve cam hazırlamada,
- Enerji sektöründe; bakır ve alüminyum iletkenlerin iletim noktalarında, türbin ve pompa onarımında, kömütatör onarımında, korozyon direncini arttırmak amacıyla,
- Medikal sektöründe; implant yüzeylerinde, aletlerin kaplamasında, elektrotların düzenlenmesinde,
- Metal sektöründe; mil komponentlerdeki kaplamalarda, bi metal üretiminde, döküm onarımında
- Tarımcılıkta; motor yapımında ve onarımında, rulman onarımında,
- Kimya sektöründe; boruların kaplanması, kavitasyon erozyonunu onarmak amacıyla, şaft onarımında, farklı malzemeler arası kaplamaların değişiminde,
- İnşaat sektöründe; dekoratif alanlarda, galvaniz kaplamaların onarımında, dökme demir boruların montajında,
- Denizcilik sektöründe; korozyona uğramış alanların onarımında, pompa onarımında, camlarda oluşan buğuların giderilmesinde, kaplamalardaki çürümelerin önlenmesinde kullanılır [3].

SGDP yöntemi, yukarıda belirtildiği üzere, genellikle yüzeysel onarım, korozyona uğramış alanların onarımı gibi sebeplerle kullanılan önemli bir yöntemdir. Bununla birlikte sahip olduğu avantajlar sayesinde birçok farklı endüstriyel alanda kullanılmaktadır [3].

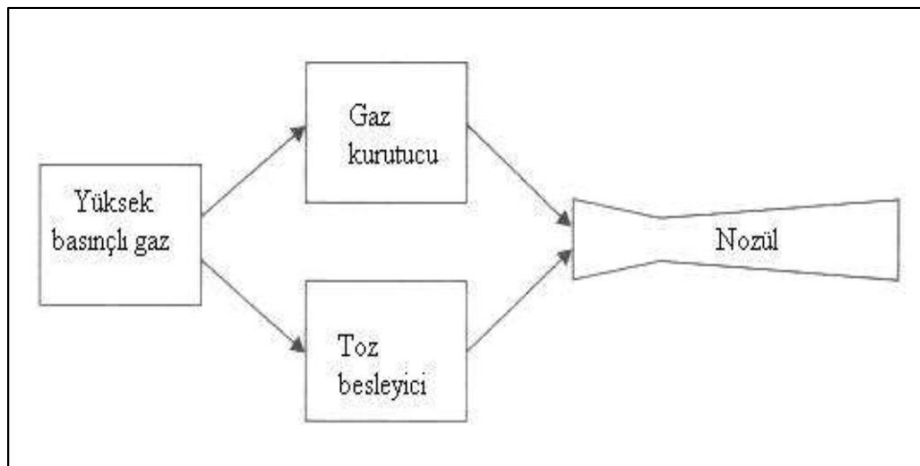
2.1.4 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Sistemleri

SGDP, Soğuk sprey prosesi toz parçacıklarının çok yüksek hızla (supersonik) ivmelendirilerek yüzeye carpmaları sonucunda parçacıkların deformasyon kabiliyetine bağlı olarak yüzeyde birikmesine olanak sağlayan bir kaplama prosesidir. Bu yüksek ivmelenme proses gazlarının (hava, azot, helyum ve karışım kombinasyonu) önce ısıtılması ve basınç altında sıkıştırılmasını takiben nozülde (Laval Nozul) genişleterek çıkışı ile sağlanmaktadır [4].

SGDP, portatif veya istasyon tipi cihaz ile yapılabilmektedir. İki sistemin temel farklılıkları, gaz basıncı ve tozların akış hızıdır. İstasyon tipi sistemlerde daha yüksek basınçlara çıkılabilmekte olup; genellikle daha özel bir yüksek basınç kompresörü bulunmaktadır [4].

Portatif sistemlerde, tabanca kaplamayı yapan insan tarafından manuel olarak kullanılır. Bu sebeple tabancanın kontrolü tamamen insanın kontrolündedir. Hareket hızı, altlık ve tabanca arasındaki mesafenin ard arda yapılan kaplamalarda sabit şartlarda olması portatif sistemlerde güçleşebilmektedir. İstasyon tipi robotlarda manuel bir system yoktur, tabanca robotik bir sistemin koluna bağlıdır. Ulaşılması zor yerlerdeki kaplama uygulamalarında portatif sistemler daha avantajlıdır [4].

Şekil 2.2’de istasyon tipi sistemlerin şematik gösterimi yer almaktadır. Bu ünite de gaz ve toz akışı yüksek basınçlı akım içerisinde nozüle iletilip nozul içerisinde karışmaktadır. Karışım haznesinden geçerek nozul içerisinde püskürtülür. Bu konfigürasyon, genellikle yüksek basınç ile çalışabilecek şekilde olması gerektiğinden istasyon tipli cihazlarda görülmektedir.



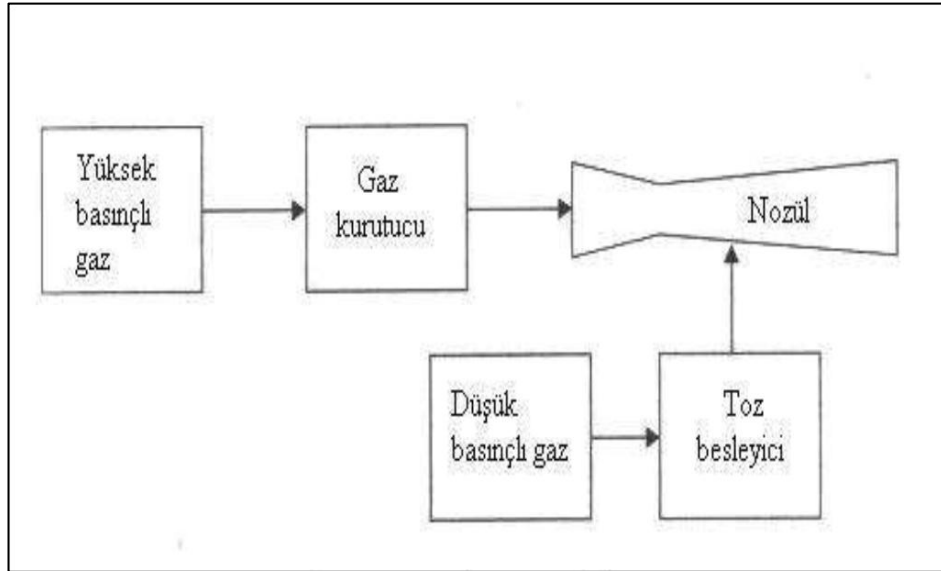
Şekil 2.2 : İstasyon tipi sistemlerin şematik gösterimi [5].

Şekil 2.3'te kabin tipi sistemlere örnekler verilmiştir.



Şekil 2.3 : Kabin tipi sistemler [5].

Şekil 2.4'te portatif tip cihaz kurulumunu gösterilmektedir. Bu sistemlerde, toz besleme düşük basınçlı taraftan başlar. Toz iletimi için besleme ünitesinde genellikle atmosferik basınçlı hava kullanılır, yüksek basınç gerektirmediğinden bu sistem genellikle portatif tipte soğuk dinamik sprey kaplamalarda kullanılır.



Şekil 2.4 : Portatif tip sistemlerin şematik gösterimi [5].

Şekil 2.5'te portatif olarak kullanılan sistemlere örnekler verilmiştir.

Her iki sistemin özelliklerine ve Çizelge 2.1'de verilen parametrelerine bakıldığında, gaz basıncı ve gaz / toz akış hızı gibi farklılıklar göze çarpmaktadır. Portatif sistemlerde hazır, sıkıştırılmış hava vakumlanarak kullanılırken; istasyon tipi sistemlerde yüksek basınçlı gazları oluşturmak için yüksek basınç kompresörü kullanılır.

Portatif sistemlerde, gaz olarak hava kullanılır; istasyon tipli sistemlerde ise helyum gibi gazlar kullanılabilir.



Şekil 2.5 : Portatif tip sistemler [6].

Çizelge 2.1 : İstasyon tipi ve portatif sistemlerinin işlem parametreleri [9].

İşlem Parametreleri	İstasyon Tipi Sistemler	Portatif Tip Sistemler
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

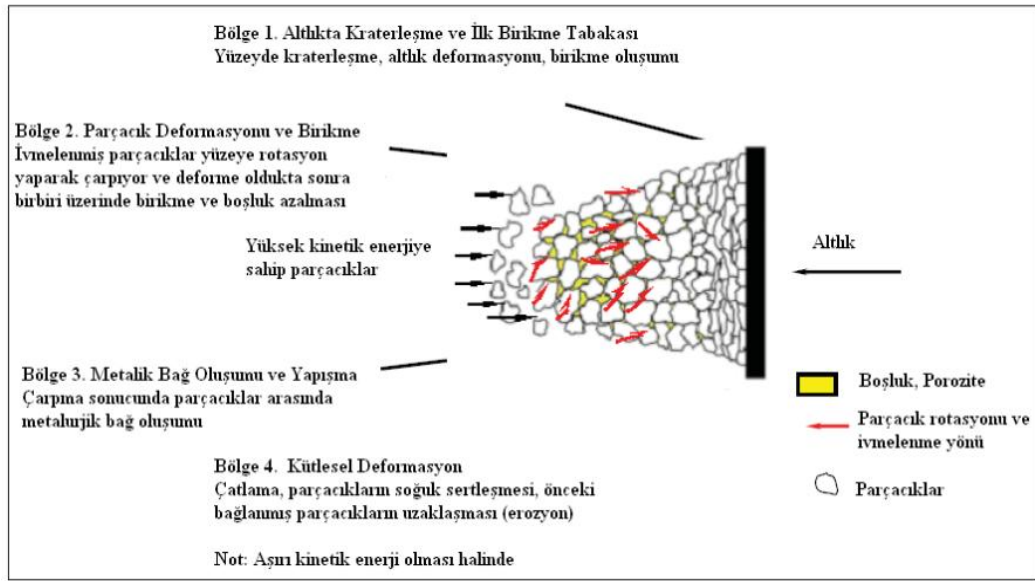
2.1.5 Kaplama Oluşumu

Soğuk gaz dinamik püskürtme mekanizmasında ilk olarak nozulün ucundan püskürtülen çok yüksek hızlı parçacıklar substrat yüzeyini temizleyip aktive etmektedir. Yüzeye çarpan parçacıklar, kesme kuvvetleri sebebiyle plastik deformasyona uğrayarak şekil değiştirmektedir.

Parçacıkların yüzeye yapışabilmesi için kritik çarpma hızına ulaşmaları ve %50'sinin yüzeye çarpması gerekmektedir. Kaplama yapısı, parçacıkların birbirleri üzerinde temas ederek metalurjik bir yapışma sağlaması ile oluşmaktadır. Aşırı kinetik enerji

oluşması, kaplama esnasında çekme gerilmelerinin artışına sebep olmakta ve yapışan tabakayı erozyona uğratabilmektedir [9-11].

Şekil 2.6’da kaplama oluşum mekanizması şematik olarak gösterilmektedir. Kaplama mikroyapısı ve mekanik özellikleri, kullanılan toz malzemesinin türüne, boyutuna, boyut dağılımına ve altlık yüzeyine çarpma hızına bağlı olarak değişebilmektedir. Tercihen, homojen ve dar toz boyut dağılımı kullanılmaktadır [10].



Şekil 2.6 : Soğuk spray prosesinde kaplama oluşumu [5].

Yapışma esnasındaki kritik parçacık hızının belirlenmesine; malzemenin ergime sıcaklığı, ısı kapasitesi ve deformasyon kabiliyeti etki etmektedir. Kritik parçacık hızının hesaplanması için Denklem 2.1’deki eşitlik kullanılmaktadır. Çizelge 2.2’de farklı malzemelerin yapışma için kritik hızları verilmektedir [10].

$$V^* = \sqrt{A\sigma / \rho + BC_p (T_m - T)} \quad (2.1)$$

σ : Sıcaklığa bağlı akış gerilmeleri

ρ : yoğunluk

C_p : ısı kapasitesi

T_m : ergime noktası

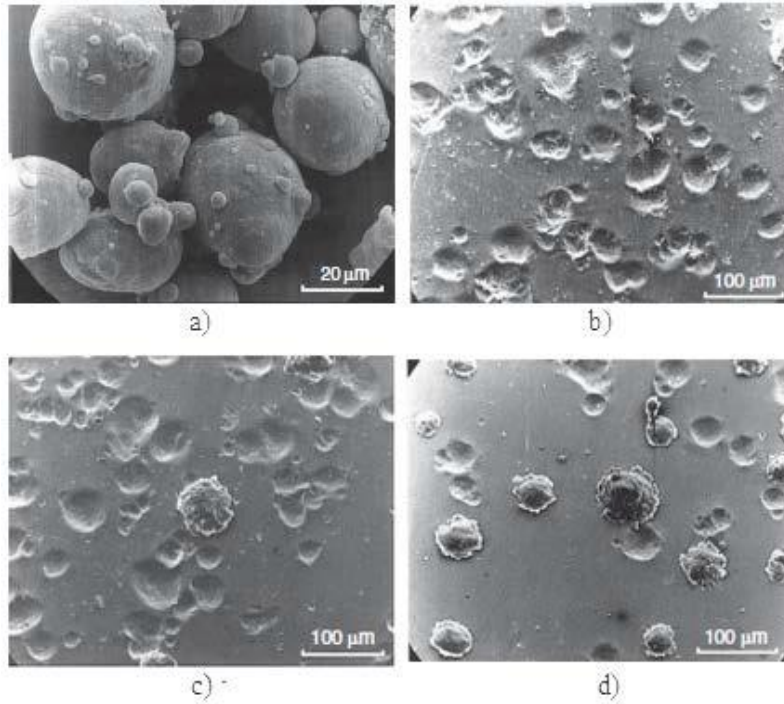
T : parçacık sıcaklığı,

A=4 ve B=0.25 deneysel olarak en iyi yaklaşımı veren sabit katsayılardır.

Çizelge 2.2 : Metalik tozların yüzeye yapışabilmesi için gerekli kritik çarpma hızları [11].

Malzeme	Ergime Noktası (°C)	Kritik Hız V^* (m/s)
Alüminyum	660	620-660
Titanyum	1670	700-890
Kalay	232	160-180
Çinko	420	360-380
Paslanmaz çelik (316L)	1400	700-750
Bakır	1084	460-500
Nikel	1455	610-680
Tantalyum	2996	490-550

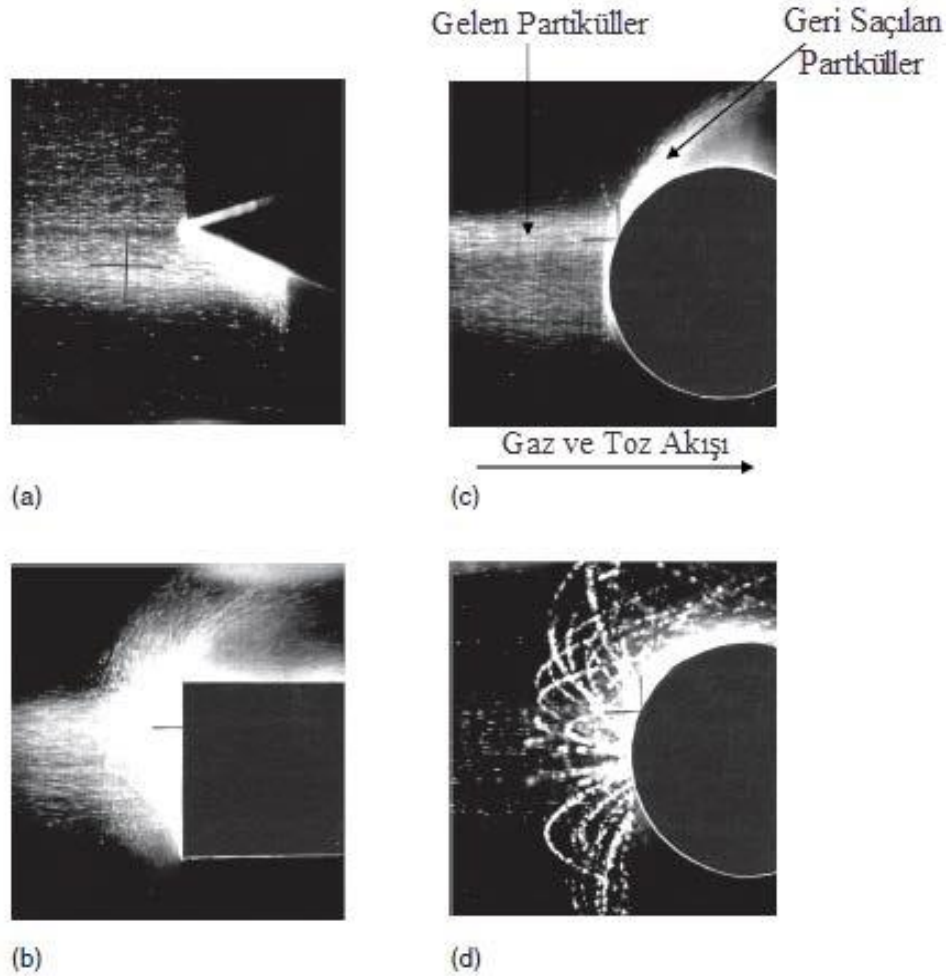
Şekil 2.7a’da farklı Al partiküllerinin ve farklı hızlarda Cu yüzeyine püskürtülen Al partiküllerinin yüzey etkileşimleri görülmektedir. Şekil 2.7b’de parçacık hızının düşük olduğu, bağlanamayıp erozyona uğrattığı yüzey yapısı, Şekil 2.7c ve 2.7d’de ise kritik parçacık hızına ulaştığı, yüzeye bağlanıp kaplama oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.7 : (a) Al partikülleri (b) 730 m/s (c) 780 m/s (d) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partiküllerinin etkisi [7].

Kaplama oluşumu esnasındaki plastik deformasyon dışında partikül hareketlerinden ve yüzeye ilk temas konularının da irdelenmesi gereklidir. Şekil 2.8’de püskürtülen partiküllerin hareket yörüngeleri görülmektedir. Kaplanacak malzemeye çarpıp geri saçılan partiküller açık bir şekilde görülmektedir. Geri saçılan bazı partiküllerin geri dönüş açısı gelme açısı ile aynı veya yakın olduğu zamanlarda bu partiküller geri dönerken kendini arkadan gelen akış yoğunluğu içerisinde bulup tekrar geri dönerek kaplanacak malzemeye bir kez daha çarparlar.

Eğer bu döngü devam ederse, geri dönmüş partiküllerin geri dönüş mesafeleri zaman içerisinde azalır ve malzeme yüzeyinde birikme oluşarak kaplama meydana gelir. Gelen ve yansıyan partiküller arasındaki yoğun etkileşimden dolayı, konsantrasyonu giderek artan bir bölge oluşur [12].



Şekil 2.8 : (a) Lazer saçılma metoduyla çekilen toz yörünge fotoğrafları. Silindir ve Küre gövde çapı yaklaşık 8 mm (a) kama yarığı ve Al parçacıkları (b) silindir ve Al parçacıkları (c) küre ve Al parçacıkları (d) küre ve akrilik cam parçacıkları [1].

2.1.6 SGDP'nin Diğer Termal Sprey Yöntemleri ile Karşılaştırılması

Soğuk sprej prosesi, termal sprej kaplama teknolojilerinin içerisinde yer almasına karşın, bu yöntemde klasik termal sprej kaplama teknolojilerinden (alev sprej (AS), elektrik ark sprej (APS, VPS), yüksek hızda oksijen yakıt sprej (HVOF) vb.) farklı olarak, tozlar katı halde erime olmaksızın çok yüksek hızlarda yüzeye püskürtülmektedir. Diğer kaplama teknikleri ile kıyaslandığında SGDP tekniğinin çok fazla yararı bulunmaktadır.

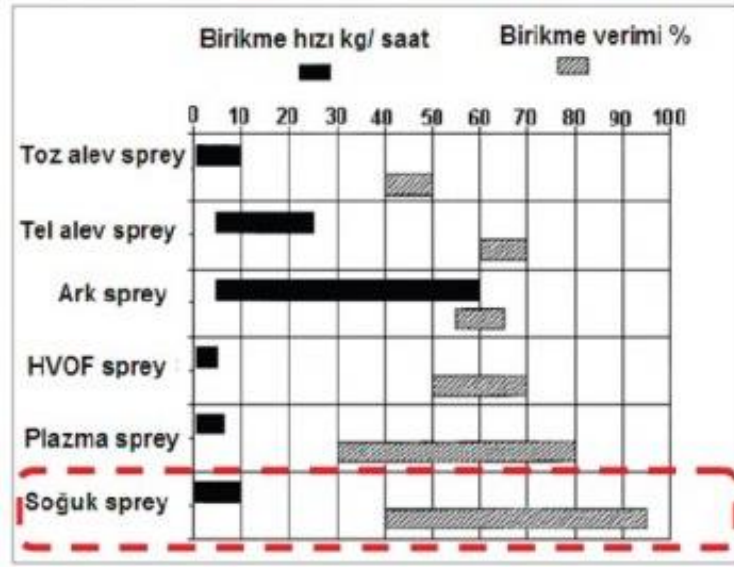
Bunlar;

- ✓ Alüminyum, bakır, nikel, tantalum, ticari saflıkta titanyum, gümüş, çinko, paslanmaz çelik ve Inconel alaşımları gibi çok şekilde metal ve alaşımlarının yoğun, kalın ve sıkı bağlanmış yapıda kaplaması elde edilebilmektedir.
- ✓ Soğuk sprej prosesi ile, bakır-tungsten (Cu-W), bakır-krom gibi metal-metal, alüminyum-silisyum karbür gibi metal karbür (Al-SiC_p) ve alüminyum-alumina gibi metal-metal oksit kompozit kaplamaları üretilebilmektedir.
- ✓ Soğuk sprej, koruyucu kaplamalar ve performans geliştirici yüzeylerin elde edilebilmesini sağlamakta ayrıca ekstra kalınlıkta kaplamalar elde edilebilmektedir [5].

Geleneksel termal sprej kaplama proseslerinde kullanılan toz metal malzemeler yüksek sıcaklık ile oksitlenerek kaplamada oksitlenmeye sebep olabilmektedir. HVOF ve plazma sprej kaplamalarda da oksitlenme anlamında olumlu sonuç alınabilmesine karşın; proses ve ekipman maliyetleri oldukça yüksektir [7].

Soğuk dinamik sprej kaplama prosesinde, termal sprej kaplamada karşılaşılan eritme, buharlaşma, faz dönüşümü, oksidasyon, rekristalizasyon, artık gerilme, yapışmama gibi problemler önlenebilmektedir. Geleneksel yöntemlere göre yüksek sıcaklıklara çıkılmadığı için soğutma gereksinimi de azdır. Bunun dışında, SGDP tekniğinde kaplama öncesinde yüzey pürüzlendirme gereksinimi bulunmamaktadır. Bu proses ile elde edilen metal kaplamalarda yüksek birikme hızı ve yapışma mukavemetine ulaşılabilir [10].

Termal sprej kaplamaların birikme hızı ve verimliliği Şekil 2.9' da karşılaştırılmaktadır. Soğuk sprej prosesinin birikme hızı diğer yöntemlerden daha yüksektir. Örneğin bakır kaplamalar %97 oranında verimlilik ile kaplanabilmektedir.



Şekil 2.9 : Termal sprej kaplama yöntemlerinin birikme verimi [15].

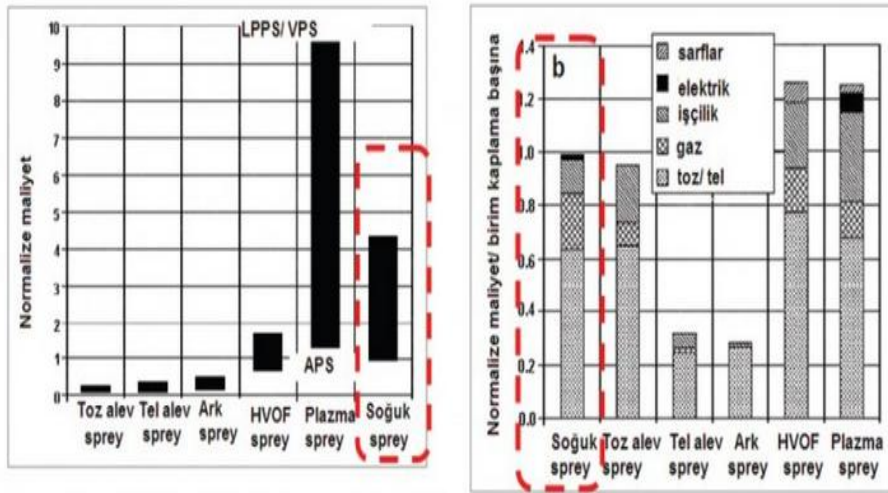
Şekil 2.10’da görüldüğü gibi, püskürtme hızının artması kaplamalarda oksit ve porozite oranını azaltmaktadır. Soğuk sprej prosesi en düşük oksit ve porozite oranına sahip kaplamalardır [15].

Proses	Porozite %	Oksit %
Soğuk sprej	0.1-1	Toz ile aynı
HVOF sprej	1-5	0.2-1
Alev sprej	10-25	4-6
Ark sprej	10-15	0.5-3
Plazma sprej	1-20	0.5-1

Şekil 2.10 : Termal sprej kaplama yöntemlerinin oksit ve porozite oranları [15].

Termal sprej prosesleri arasında yatırım maliyeti açısından bir karşılaştırma (Şekil 2.11a) yapıldığında, en düşük maliyetli proseslerin ark sprej ve alev sprej prosesleri olduğu görülmektedir. Soğuk sprej prosesi (özellikle yüksek basınçlı sistem) plazma sprejden düşük, HVOF prosesinden ise daha yüksek yatırım maliyeti gerektirmektedir. Yatırım maliyetinin önemli bir kısmını toz besleyici ve gaz ısıtıcı ekipmanları tutmaktadır. Buna karşın uygulama pratikliği, birikme verimi ve kaplama kalitesi açısından değerlendirildiğinde yüksek performans göstermektedir.

Proses giderlerinin önemli bir kısmını toz ve gaz giderleri oluşturmaktadır (Şekil 2.11b).



Şekil 2.11 : Termal sprej kaplama yöntemlerinin (a) yatırım maliyetlerinin ve (b) giderlerinin karşılaştırılması [15].

Gaz maliyeti soğuk sprejde en yüksek seviyededir. Özellikle pahalı He gazının kullanılması durumunda maliyet önemli ölçüde artmaktadır [15].

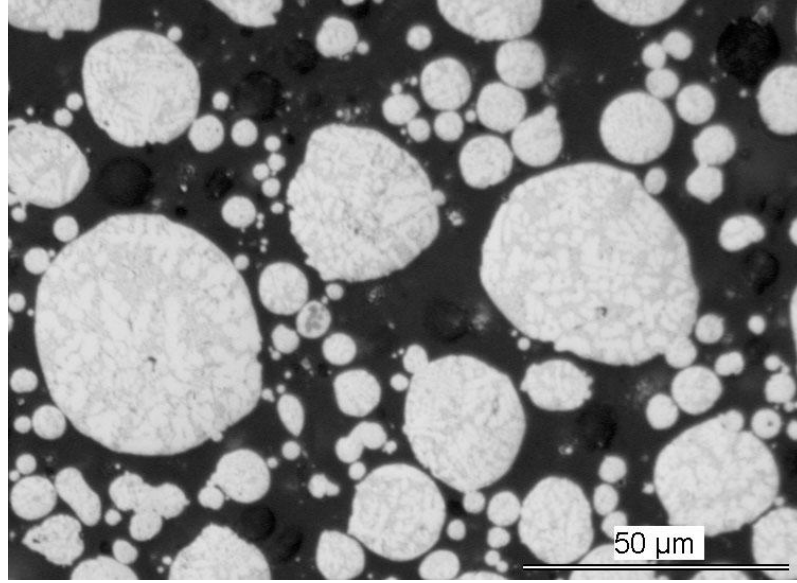
2.1.7 SGDP Tekniğinde Al₁₂Si ve SiC_p Tozlarının Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılması

Alüminyum matrisli kompozitlerin karakteristikleri matris malzemesi dışında kullanılan takviye malzemesinin özelliğine de bağlıdır. Kaplama malzemesi olarak sıklıkla kullanılan silisyum karbür (SiC_p), yüksek sertliği, kimyasal ve termal olarak kararlı olması, kompozit malzemeye mukavemet ve korozyon direnci sağlar [16].

Alüminyumun ergimesi, seramik partiküllerinin ve ergimiş alüminyumun olası reaksiyonu gibi sebeplerden dolayı kaplama içerisinde düşük poroziteli, homojen bir seramik takviyeli alüminyum kompozit kaplamaları genellikle zor proseslerdir. Soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği ile termal sprej yöntemlerinde oluşan problemler elimine edilerek verimli bir şekilde kaplama yapılabilir [17].

Al₁₂Si tozları, soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinde kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi, toz partikülleri küresel biçimdedir. Al₁₂Si kompozisyonu

AlSi sisteminin ötektik reaksiyonunun gerçekleştiği kompozisyona yakın olduğundan, partiküller ötektik mikroyapısına sahiptir. Bu tür mikroyapı ve silisyumun düşük sünekliği sayesinde Al₁₂Si alaşımı saf alüminyumdan çok daha fazla mukavemet kazanır.



Şekil 2.12 : Al₁₂Si alaşımasının mikroyapısı [17].

Şekil 2.12’de görülen beyaz kısımlar alüminyumca, koyu renkli kısımlar ise silisyumca zengindir [17].

2.2 Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

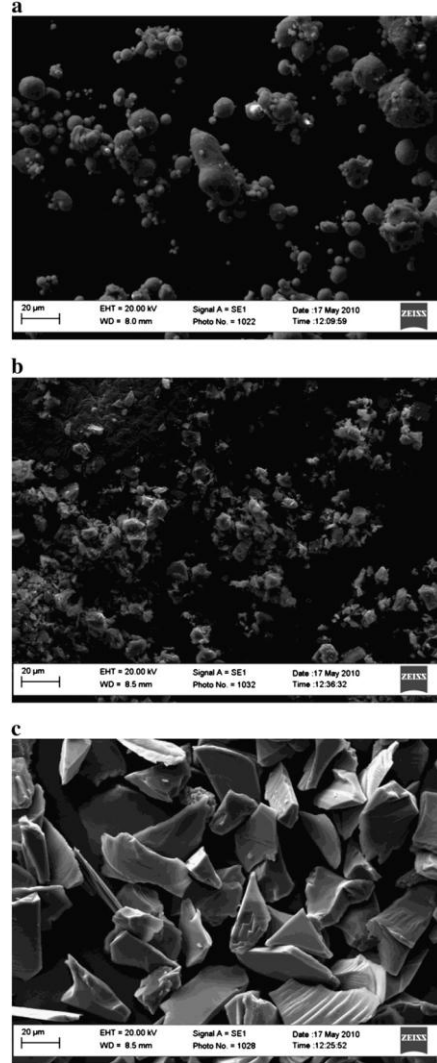
Meydanoğlu ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada [18], soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği ile T6 6061 Al alaşımı üzerine B₄C veya SiC_p takviyeli, 7075 Al matrisli kaplamalar yapılmış ve karakterize edilmiştir.

B₄C ve SiC_p toz partikülleri hacimce %10 ve %20 olarak 7075 Al alaşımı ile karıştırılmıştır. Şekil 2.13’de 7075 Al, B₄C ve SiC_p toz partiküllerinin tipik morfolojileri; 7075 partiküllerinin küresel ve B₄C ve SiC_p tozlarının yapısı görülmektedir.

Kaplama cihazı nozülü altlıktan 10 mm uzaklıkta tutulmuştur. Kaplama sırasında altlık malzemesinin hareketi 2 eksenli ve 1 mm/s hızlı bir system ile kontrol edilmiştir. Mikroyapı karakterizasyonları optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve X ışınları difraktometresi ile yapılmıştır.

Kaplanan numuneler, metalografik yöntemler ile hazırlanıp, kesitleri üzerinden SEM (EVO-MA10, Zeiss) cihazı ile analiz edilmiştir. XRD analizi ise, GBC X-ışını difraktometresi ile yapılmış olup, 38 kV voltajda ve 28.5 mA değerinde analiz yapılmıştır. Mekanik özellikler ise mikrosertlik ve aşınma deneyleri yapılarak gözlemlenmiştir. Vickers cihazı olarak Struers Duramin cihazı kullanılmış, 300 g

yük altında 15 sn bekletme ile sertlik testleri yapılmıştır. Aşınma testleri TRIBOTECH aşınma cihazında atmosferik koşullarda ve 1 N yük altında yapılmış olup; 6 mm çaplı Al_2O_3 top kullanılmıştır. Aşınma testleri sonucunda oluşan aşınma izleri Veeco stylus profilometresi ve Hitachi TM1000 taramalı elektron mikroskobu ile analiz edilmiştir. Aşınma testlerinin sonuçları kaplamaların gördüğü hasara göre değerlendirilmiştir.



Şekil 2.13 : 7075 Al, B_4C ve SiCp toz partiküllerinin morfolojileri [18].

Korozyon testleri, 3 elektrotlu potansiyodinamik test ünitelerinde ağırlıkça %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde, oda sıcaklığında yapılmıştır.

Hacimce %20 seramik içerikli partiküllerin kaplama-altlık arayüzeyinin taramalı electron mikroskop görüntüleri aşağıda görülmektedir. Görüntüler, kaplama ile altlı malzemenin birbirlerine herhangi bir süreksizlik olmadan bağlanabildiğini ortaya çıkarmaktadır. Takviyelendirilmemiş 7075 alaşımlı kaplamada hacimce $0,5 \pm 0,1$

oranında porozite görülmektedir. Ayrıca, takviyelendirilmemiş 7075 alaşımlı kaplamalarda kaplama/altlık arayüzeyinden uzak bölgelerde daha fazla porozite göstermektedir. Bu durum, kaplama yüzeyinin Al 7075 partikülleri ile plastik deformasyona uğraması şeklinde açıklanabilir.

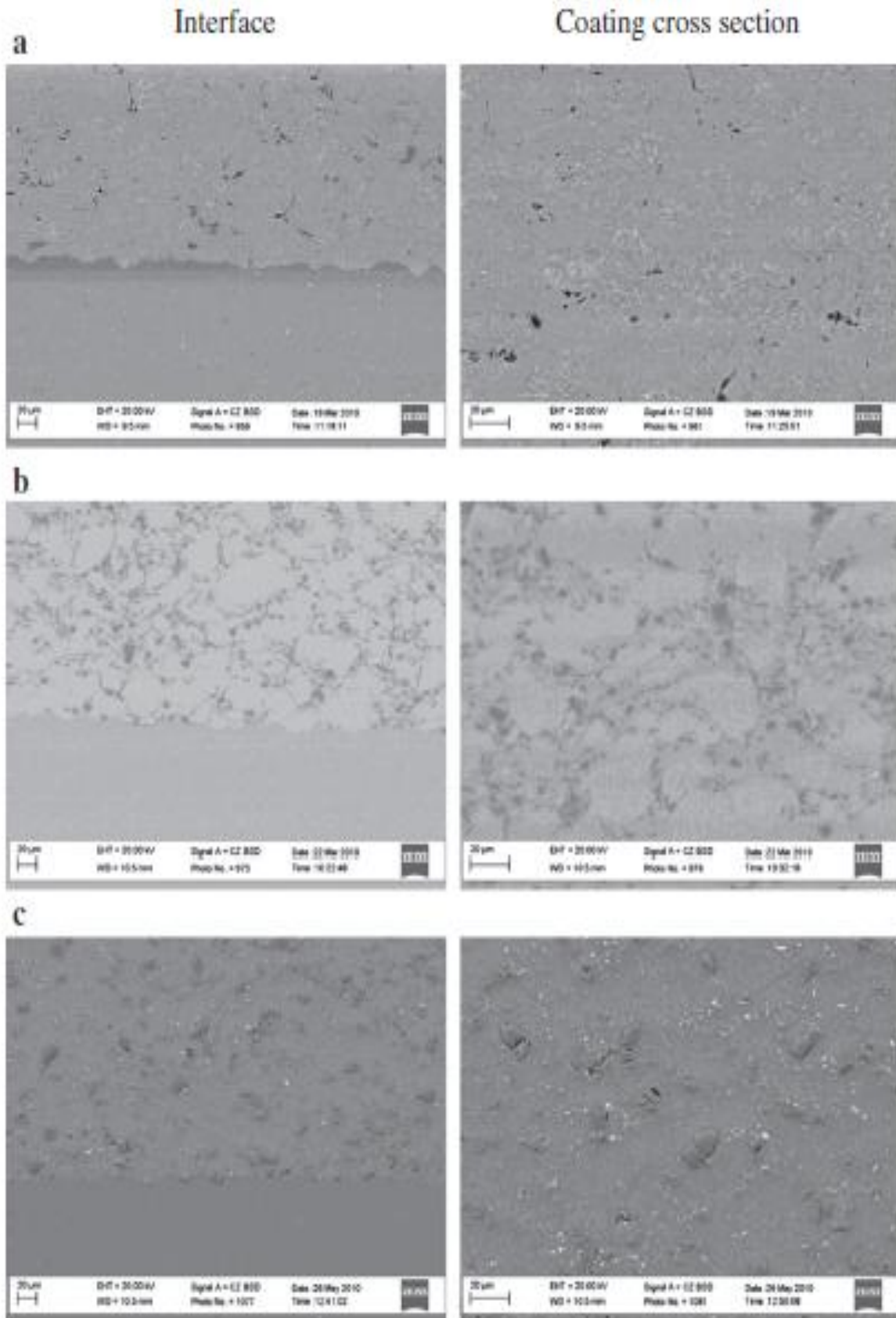
Kompozit kaplamaların kesit yüzeylerinden alınan görüntüler incelendiğinde (Şekil 2.14), oldukça yoğun ve seramik partiküllerinin homojen dağıldığı bir mikroyapının olduğu görülmektedir. Bunun dışında, seramik partikülleri kendi morfolojilerini kaybetmemiş ve plastik deformasyona uğramamıştır. Seramik partiküllerinde herhangi bir plastik deformasyon meydana gelmediğinden tüm momentum transferi daha önceden oluşmuş Al 7075 alaşımına aktarılmıştır. Bu sebeple, kompozit kaplamada düşük porozite oluşması 7075 Al alaşımlarında oluşan plastik deformasyon ile ilişkilendirilebilir.

Bunun dışında seramik partikül içeriği ile porozite miktarı arasında herhangi bir bağlantı kurulmamıştır.

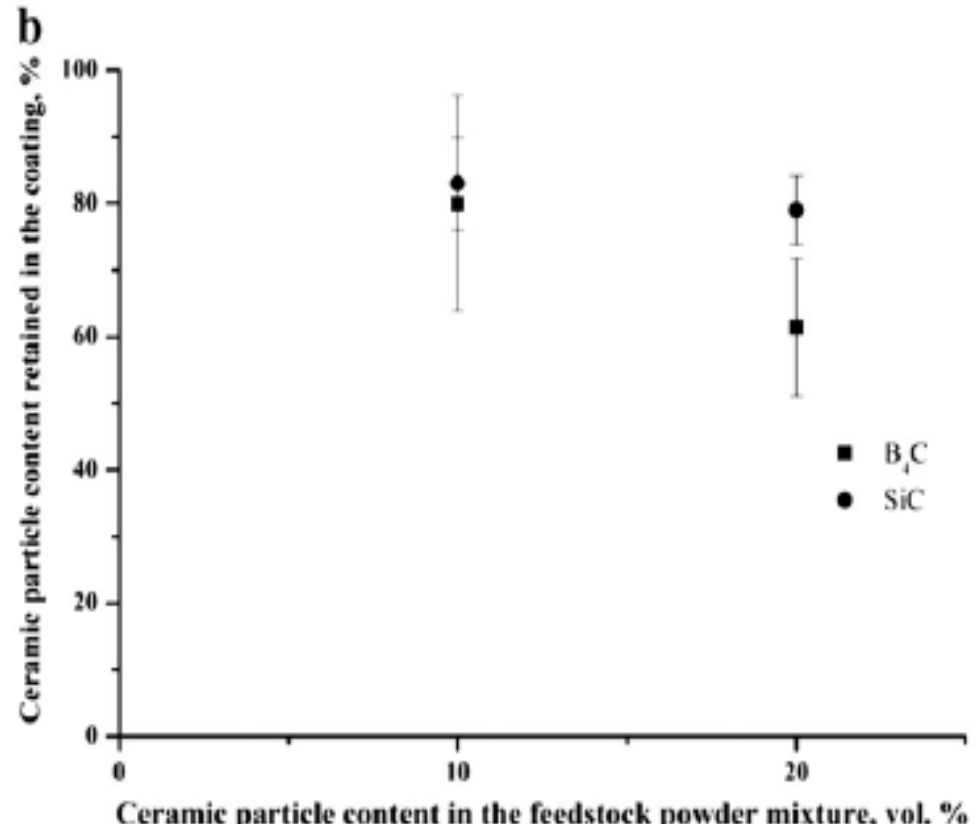
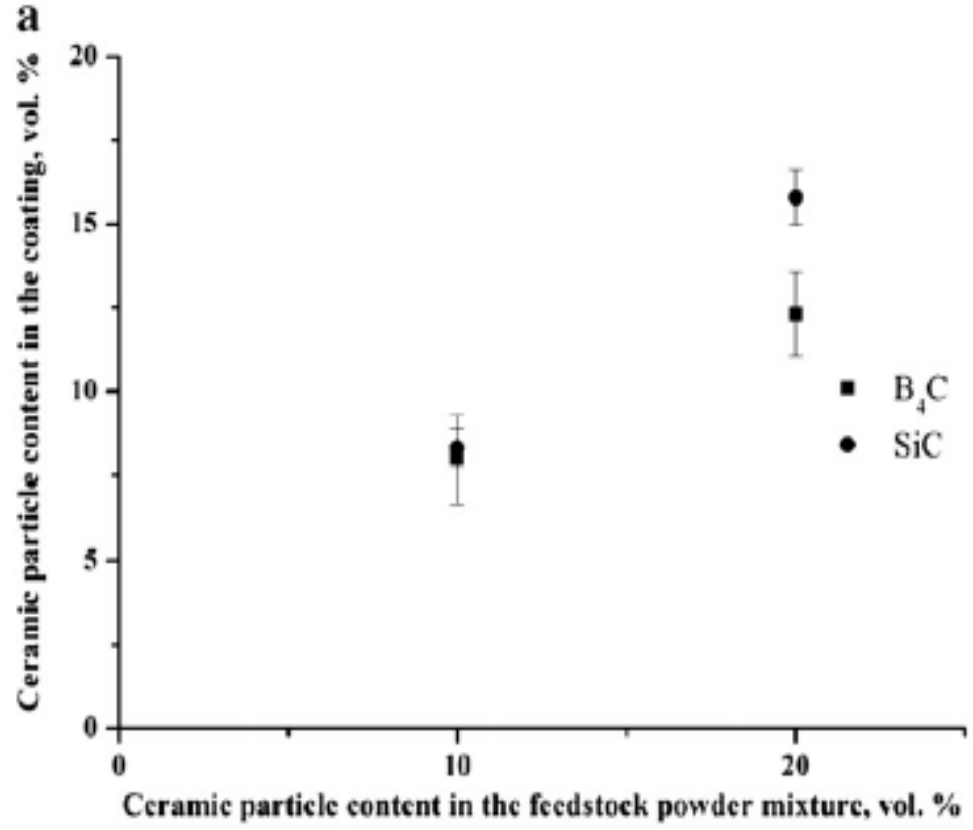
SiC_p takviyeli kompozit kaplamaların mikroyapılarında bir takım beyaz tabakalar görülmektedir. EDS analizlerinde ortaya çıkan bu görüntüler, bu alanların Fe, Ni ve Cr kalıntılarından oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 2.15'te, hacimce seramik partikül içeriği karşılaştırılmıştır. Görüntü analizleri, kaplamadaki seramik partikül içeriklerinin, beslenen toz karışımındaki seramik içeriği ile orantılı olduğunu göstermektedir. Ancak kaplamada genellikle toz karışımından daha az miktarda bulunur. Bu gözlem, bütün seramik partiküllerinin kaplama içerisinde kalmadığını göstermektedir. Bir kısım partikül kaplama sırasında limitli plastik deformasyon kapasitelerinden dolayı geri saçılmış ve kaplama içerisine dahil olmamıştır.

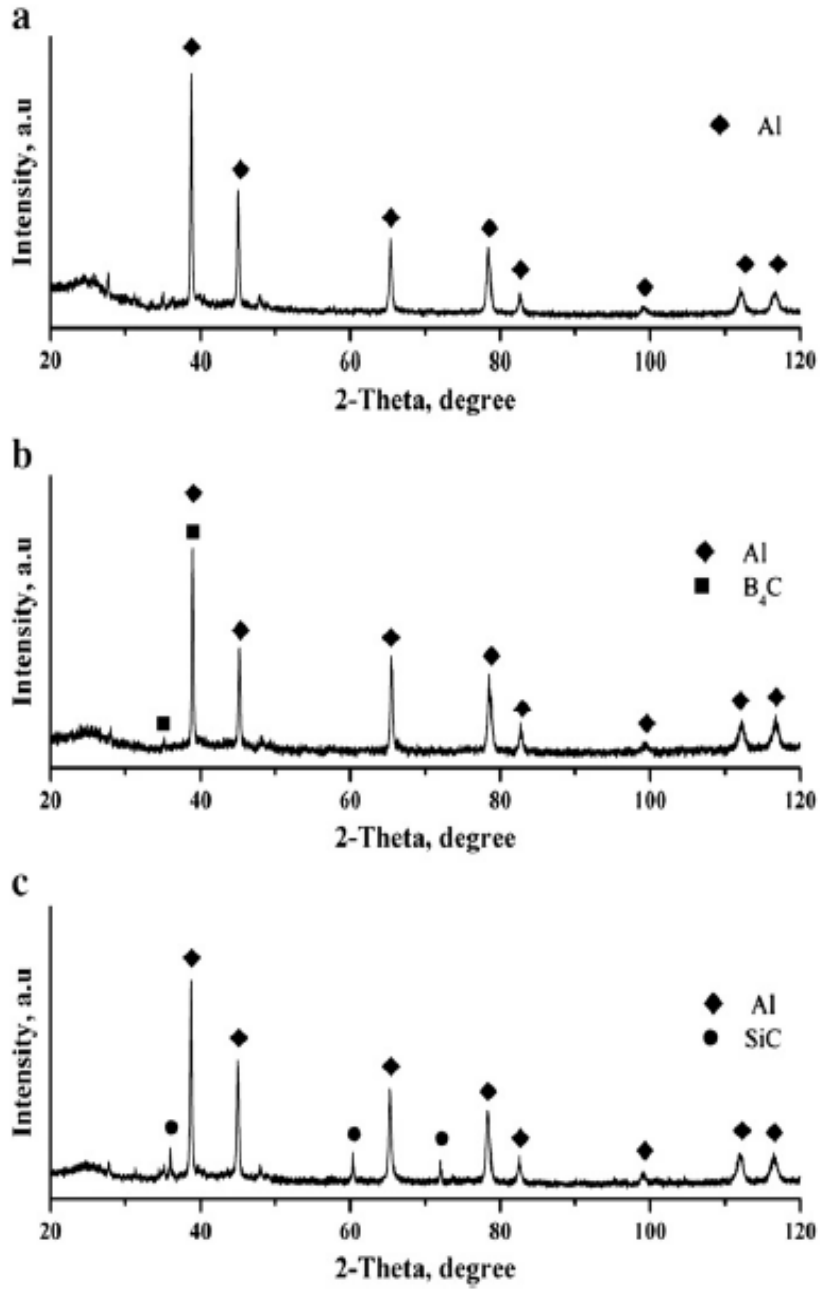
Şekil 2.16, seramik takviyesiz 7075 Al alaşımı ve %20 seramik içerikli kompozit kaplamaların XRD sonuçlarını göstermektedir. Al, B₄C ve SiC_p gibi ana fazların dışında başka faz görülmemektedir. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere, kaplama tozlarının birbirleri arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon oluştuğu görülmemektedir. Bu kaplamalarda herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşmaması, soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinin düşük sıcaklıkta yapılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.14 : Kompozit kaplamaların kesitlerinden alınan SEM görüntüleri [18].



Şekil 2.15 : Kaplamadaki seramik partikül içeriklerinin, beslenen toz karışımındaki seramik içeriği ile ilişkisi [18].

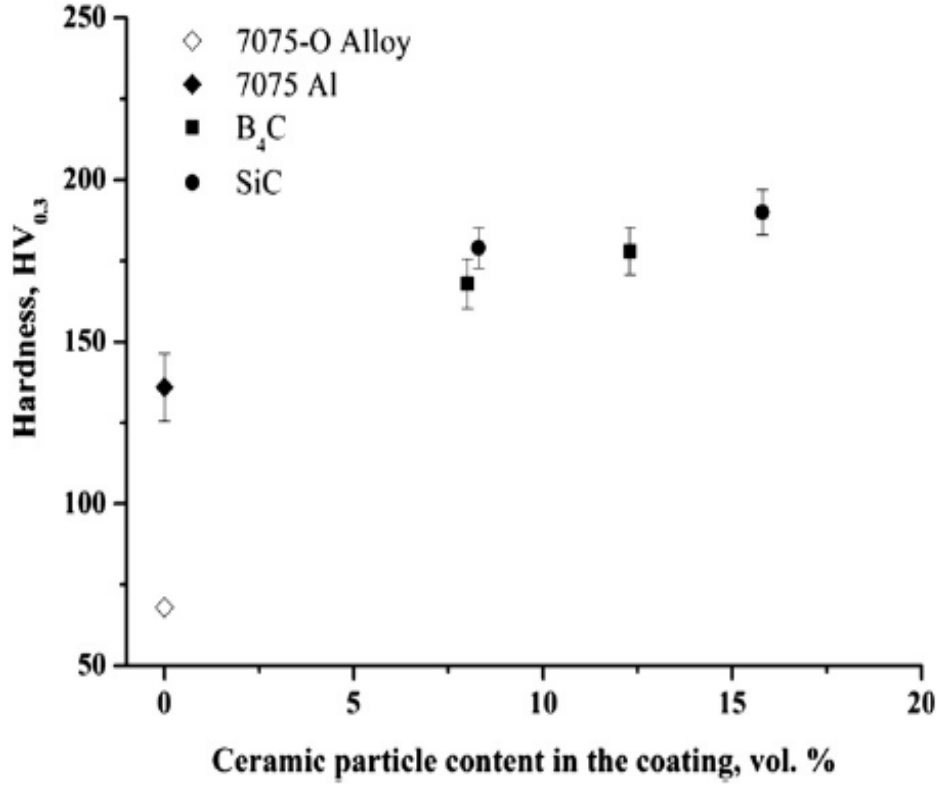


Şekil 2.16 : Seramik takviyesiz 7075 Al alaşımı ve %20 seramik içerikli kompozit kaplamaların XRD sonuçları [18].

Kaplamaların içerdikleri seramik partikülüne göre sertlik değişimi Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Partikül miktar arttıkça Vickers sertlik değerlerinde artış görülmektedir.

Numunelerin aşınma testleri, kaplamalarda oluşmuş aşınma izleri üzerinden göreceli aşınma kaybının hesaplanması ile yapılmaktadır.

Bu çalışmada aşınma kaybı, kaplamada oluşan aşınma izi alanına bağlı olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.17 : Kaplamaların içerdikleri seramik partikülüne göre sertlik değişimi [18].

Şekil 2.18, aşınma izlerinin ve aşınma testlerinde kullanılan Al_2O_3 toplarının oluşturduğu izlerin SEM görüntüleridir. Al_2O_3 toplarının oluşturduğu aşınma izlerinin görüntüleri, Al_2O_3 üzerinde daha az aşınma oluştuğunu göstermektedir. Bu sonuç, kompozit kaplamaların aşınma testlerindeki düşük malzeme transferi oluşmasından kaynaklanmaktadır.

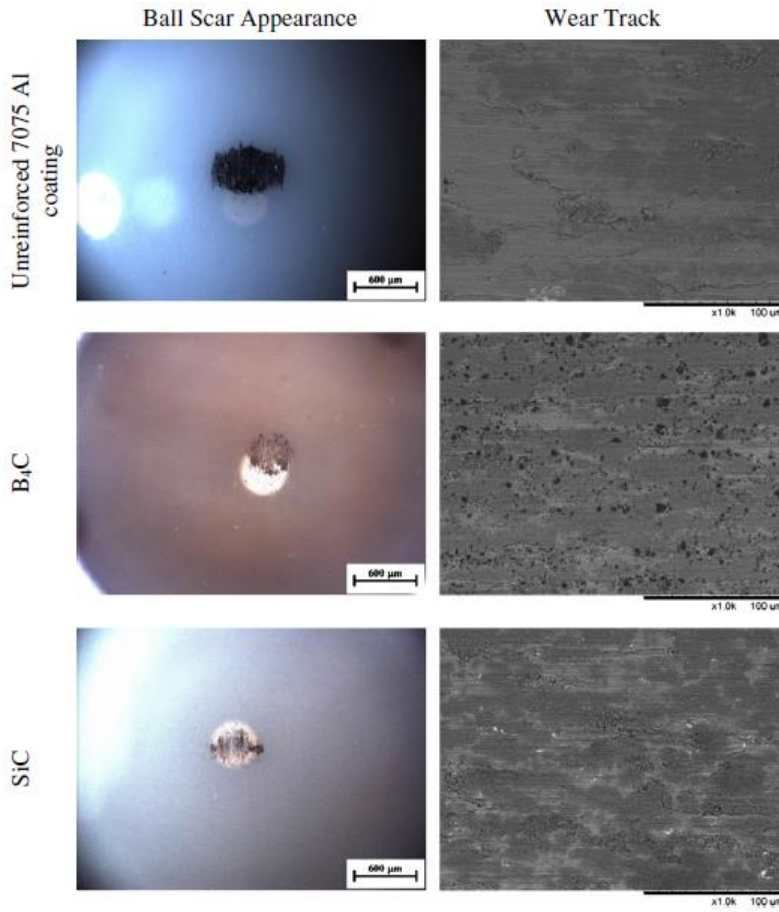
Aşınma izlerinin SEM analizleri, kompozit kaplamalarda takviyesiz 7075 Al alaşımlı kaplamalara nazaran daha pürüzsüz izlerin elde edildiğini göstermektedir. Daha pürüzsüz aşınma izleri ise top üzerine daha düşük malzeme iletilildiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen değerlere bakıldığında;

- ✓ 7075 Al alaşım matrisli, B_4C ve SiC_p takviyeli kompozit kaplamalar T6 6061 Al alaşım substratı üzerine başarılı bir şekilde kaplanabilmiştir. Kaplama ara yüzeyinde herhangi bir süreksizlik görülmemiştir.
- ✓ Kaplamanın XRD paternlerinden Al, B_4C ve SiC_p ana fazları dışında herhangi bir faz görülmemekte, bu sonuç da kaplama esnasında herhangi bir faz dönüşümü olmadığını kanıtlamaktadır.

- ✓ Seramik takviyesiz 7075 Al kaplaması 7075-O Al alaşımına göre, 7075 Al matrisinde oluşan plastik deformasyondan dolayı daha yüksek sertlik göstermektedir. Seramik partiküllerinin eklenmesi kaplamaların sertliğini arttırmaktadır.

Seramik partiküllerinin eklenmesi kaplamaların aşınma direncini arttırmıştır. Bununla birlikte, seramik partiküllerinin miktarsal olarak içeriğinin aşınma performansına tam olarak bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.

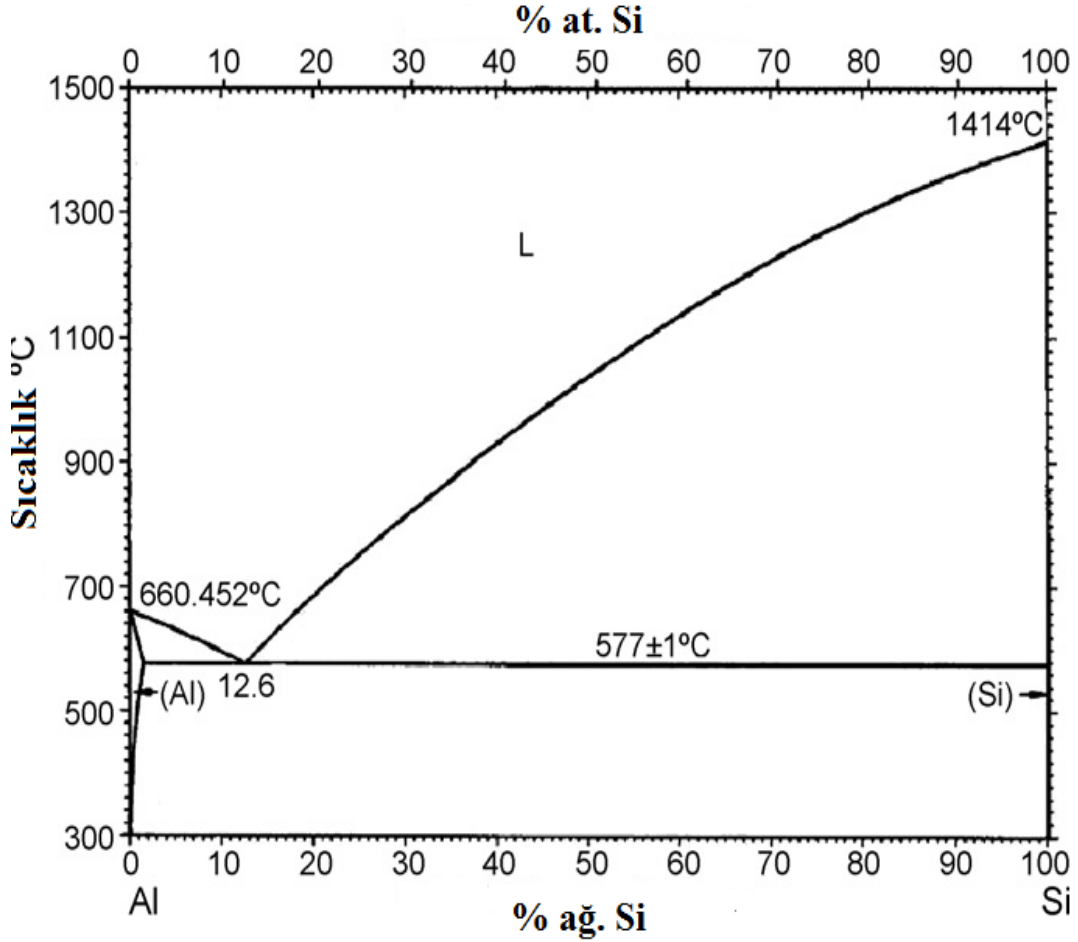


Şekil 2.18 : Alümina aşındırıcı top ve kaplamalarda oluşan aşınma izleri [18].

Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [19], Al-12 Si tozları soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği kullanılarak kaplanmış ve karakterize edilmiştir. Kaplama işlemi için çıkış ucu çapı 4,9 mm olan 170 mm'lik nozül kullanılmıştır. Hava, hızlandırıcı gaz olarak; argon ise toz taşıyıcı gaz olarak kullanılmıştır. Hava basıncı 2,7 MPa olarak, sıcaklık ise 400-560°C olarak ayarlanmıştır. Nozül altlıktan 30 mm uzakta kalacak şekilde kaplama yapılmıştır. Besleme tozu olarak 45-90 µm parçacık boyutunda Al12Si tozu kullanılmıştır. Altlık malzeme olarak düşük karbonlu çelik tercih edilmiş olup; kaplama öncesinde alümina ile kumlanmıştır [19].

Karakterizasyon çalışmaları, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskopu, EDS ve X ışını difraksiyon analizi ile gerçekleştirilmiştir.

Mikro Vickers Sertlik ölçümleri, 50 gr yük altında 15 sn süre ile yapılmıştır. Şekil 2.19'de görüleceği üzere, Al-12Si kompozisyonu, %12,6 ötektik bileşimine çok yakındır.

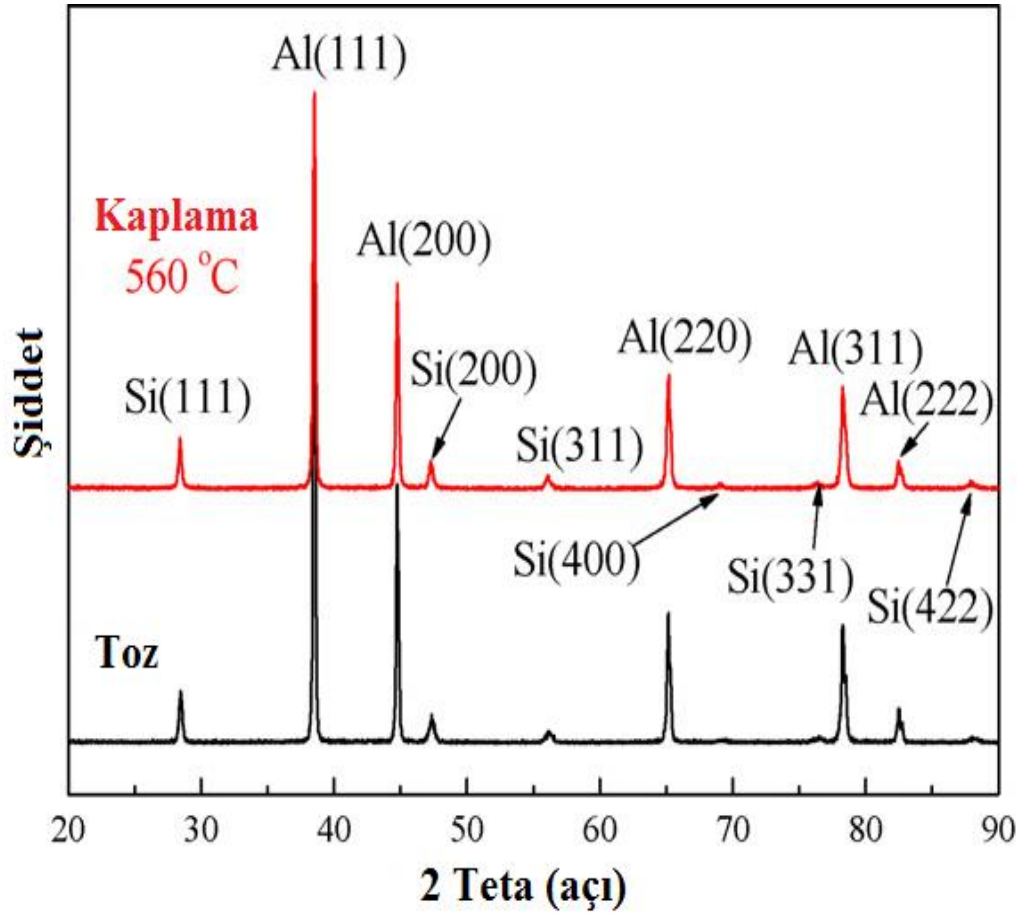


Şekil 2.19 : Al-Si Faz Diyagramı [19].

Şekil 2.20'de verilen XRD sonuçlarına göre α -Al ve Si pikleri görülmektedir. XRD analiz sonuçlarına göre, kaplama ile toz aynı kristal yapıya sahiptir. Tozun oksijen içeriği % ağı. 0,016 ve kaplamanın % ağı. 0.036 olduğu hesaplanmış ve kaplama esnasında herhangi bir faz değişimi, difüzyon, oksidasyon gerçekleşmediği belirtilmiştir.

Al-12Si tozlarının sertliği 64 ± 8 Hv_{0,05} olarak belirtilmiştir. Kaplama yapıldıktan sonra 99 ± 12 Hv_{0,05} sertliğine ulaşmış olup; sertliğinde büyük artış meydana

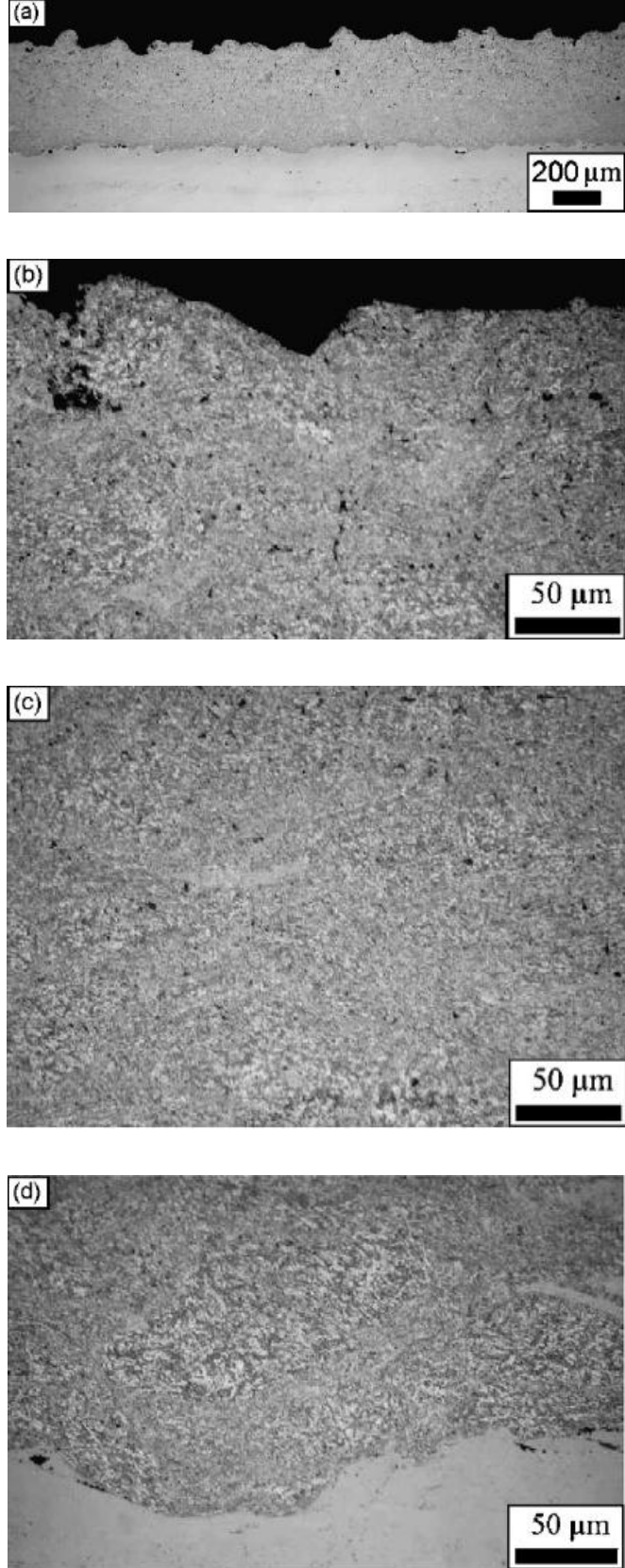
gelmiştir. Burada, sertliğin artışıdaki asıl sebep kaplamanın içerisine yayılan Si partikülleridir [19].



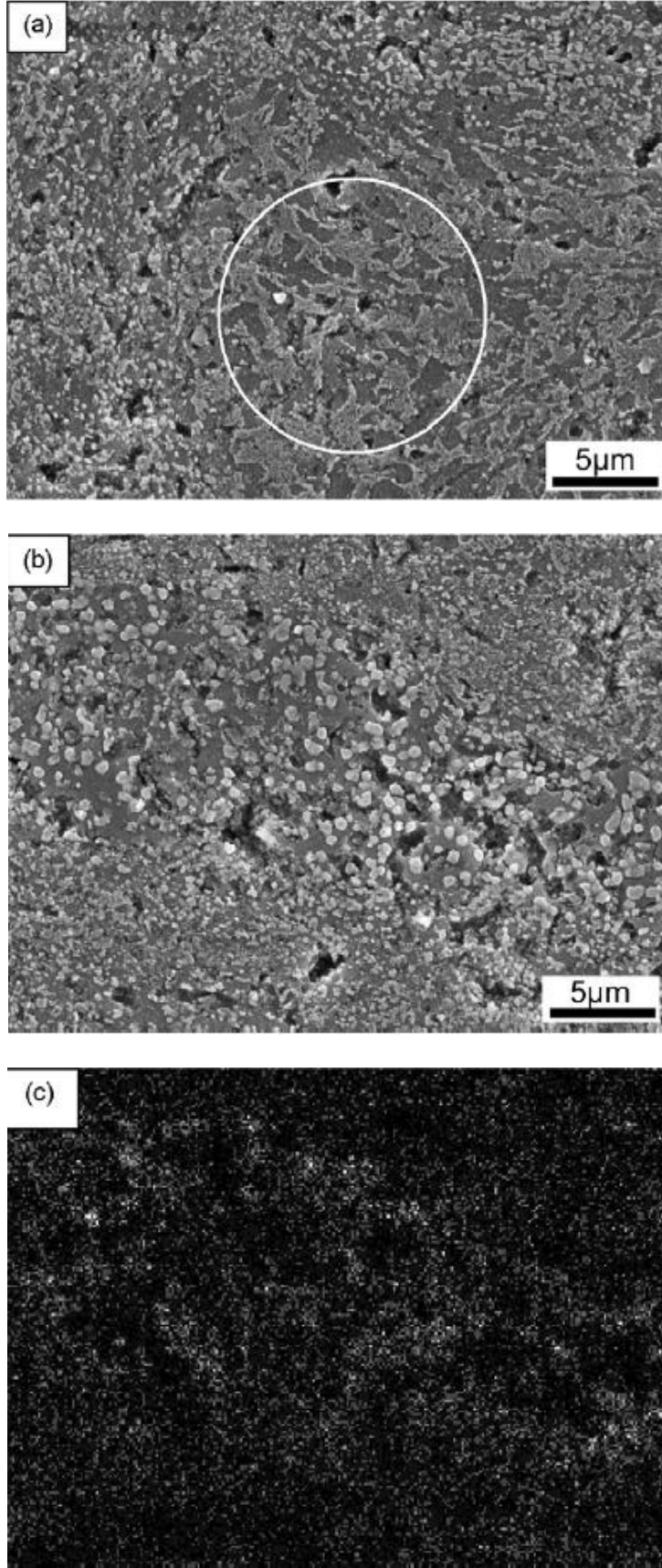
Şekil 2.20 : Al-12Si, yapısal olarak dentritik ötektoid mikro yapısından ve silisyumun düşük sünekliliğinden dolayı Kaplama öncesi ve sonrası Al-12Si X-ışını difraksiyon Analizi [19].

Al₁₂Si'nin ergime noktası 577 °C civarındadır, bu sebeple kaplama sıcaklığı 560 °C olarak seçilmiştir. Bu sıcaklıkta 400°C'ye göre daha kalın bir kaplama elde edilmiştir. Şekil 2.21'deki optik mikroskop görüntüleri kaplamanın ara yüzey bağlanma kalitesi oldukça iyi ve yoğun bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.22'de verilen SEM görüntülerinde koyu gri faz alfa alüminyum fazını, açık gri faz silisyumun yapısını göstermektedir. Görüntülerde, alfa alüminyumun içerisinde hapsolmuş silisyum fazı görülmektedir. Beyaz daire ile belirtilen kısımda, yüksek sıcaklık etkisi ile yaşlanma olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple Si partikülleri, alfa alüminyum içerisine çökelmiş ve dağılmıştır. Sonuç olarak; çökelme sertleşmesi ile birlikte sertlikte büyük bir artış görülmüştür.



Şekil 2.21 : 560 °C’de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri [19].

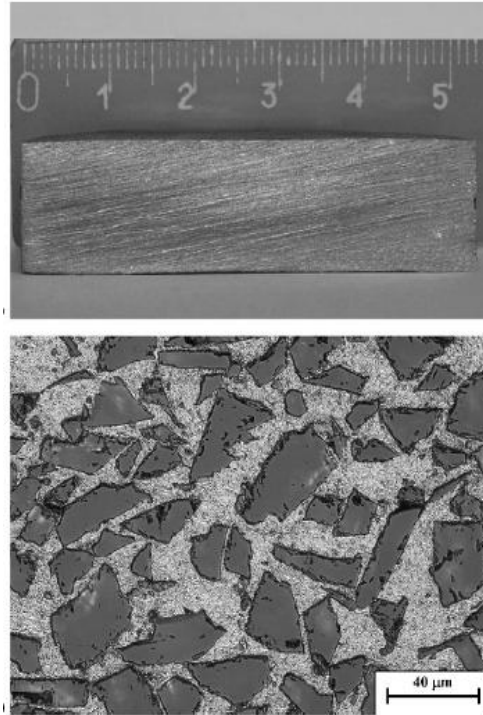


Şekil 2.22 : 560 °C’de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri [19].

Mindivan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [20], hacimce %50 SiC_p takviyeli sıkıştırılmalı dökümle üretilmiş alüminyum matrisli (2618, 6082, 7012 ve 7075) alaşımların aşınma özellikleri incelenmiştir. Aşınma deneylerinde ileri-geri hareketli bir cihaz kullanılmış olup, testler 10 mm çapında alümina top ile hem su hem hava içerisinde gerçekleştirilmiştir.

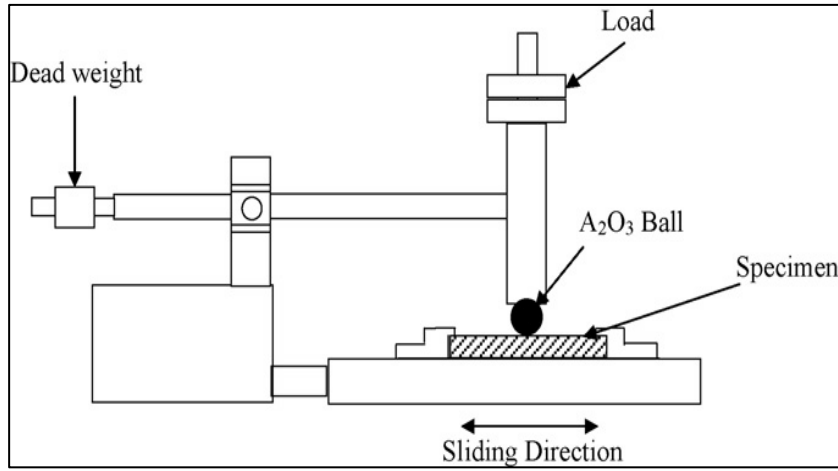
Makalede, yüksek sürtünme ve aşınma altındaki tribolojik sistemlerde, yağlayıcı kullanılması gerekliliğinden bahsedilmiştir. Bunun sebebi, hareket eden yüzeylerin yağlayıcı kullanımıyla birlikte birbirinden ayrılabilmesidir. Bu tür mekanizmalarda, basınç ile meydana gelen yükleme yağlayıcıya iletilir ve yağlayıcı film sayesinde yüklerin yüzey üstünde oluşturduğu aşınma azalır. Aşınmalı ortamlarda yağlayıcı kullanılması önemliliğinden bahsedilse de, bunun yağ kullanılarak yapılmasının çevreye verdiği zarardan bahsedilmiştir. Bu sebeple su içerisindeki aşınma ortamında aynı yağlayıcı etkinin SiC_p, Si₃N₄ bazlı seramiklerin sulu aşınma ortamında da göstereceği bildirilmiştir.

Çalışma içerisinde, sıkıştırılmalı döküm ile 50 mm çapında ve 15 mm kalınlığında disk şeklinde kompozitler üretilmiştir. Matris malzeme olarak 2618, 6082, 7012 ve 7075 Al alaşımı ve takviye malzemesi olarak 30 µm boyutlu SiC_p kullanılmıştır [20].



Şekil 2.23 : Sıkıştırılmalı dökümle üretilmiş kompozitlerin a) makro ve b) mikro yapıları [20].

Matris ve SiC_p arasındaki porozite ve süreksizlik ise, fazla büyötmelere çıkıldığında görölmemektedir. SiC_p partiköllerin hacimce oranı % 50±3 seviyesindedir. Bu makalenin kapsamında, sıkıştırılmalı döküm ve T6 ısıt işlemi görmüş kompozitler üzerinde çalışılmıştır. Deney sonuçlarına göre, matris içerisinde daha azla alaşım elementi içeren ve T6 ısıt işlemi görmüş kompozitlerin sertliği daha yüksek bulunmuştur. Tribolojik özellikleri analiz etmek için, ileri-geri hareketli bir aşınma testi ASTM G133 standardına göre yapılmıştır. Şekil 2.24 kullanılan aşınma test cihazının şematik olarak görölmektedir.



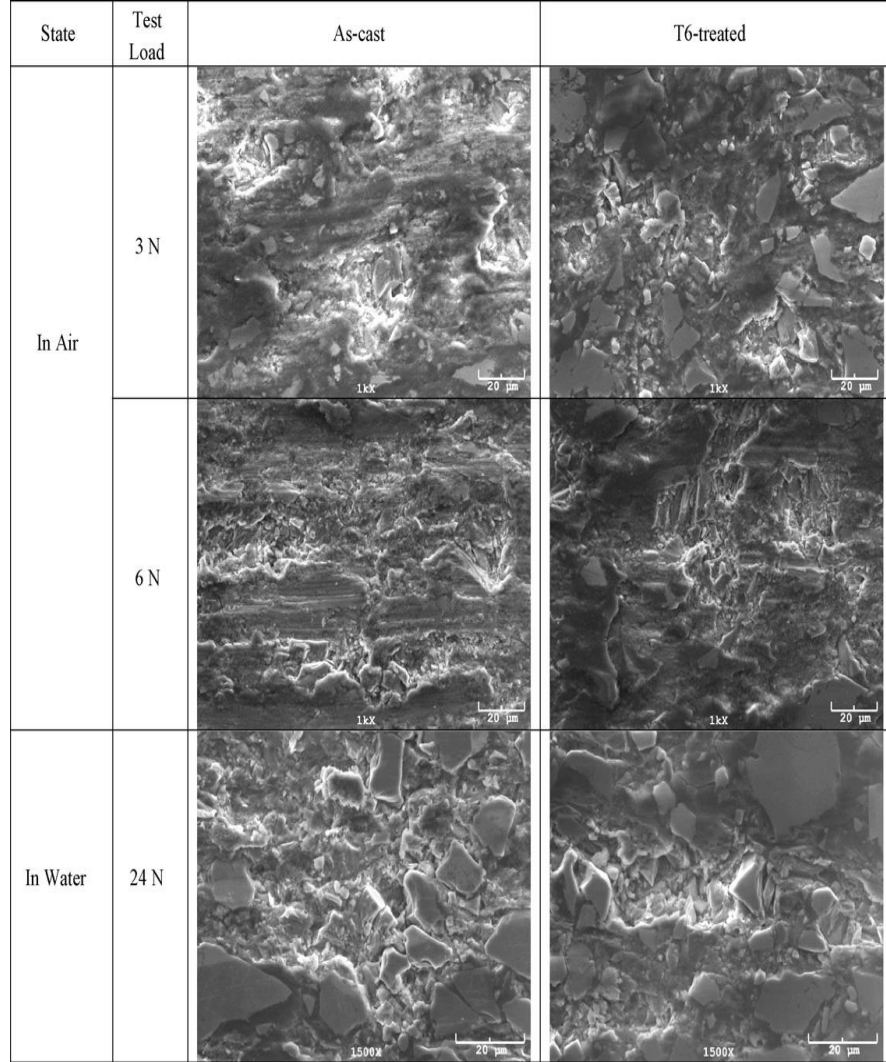
Şekil 2.24 : Aşınma Testinde kullanılan ileri geri hareketli aşınma cihazı[20].

Aşınma testlerinde, aşındırıcı top olarak 10 mm çaplı Al₂O₃ kullanılmıştır. Alumina topun vuruş mesafesi ve kayma hızı 12 mm ve 0,02 m/s'dir. Testler 120 m kayma mesafesi altında yapılmıştır. Yöklmeler hava içerisinde 1,5-6 N, su içerisinde 18-24 N arası kuvvetler altında gerçekleştirilmiştir. Bu değlerlerden göröleceğı üzere, çalışma içerisinde uygulanabilecek maksimum yük 24 N olarak belirlenmiştir. Test süresince, sürtünme kuvveti bilgisayar ekranından kontrol edilip, kayıt edilmiştir. Aşınma izleri, profilometre ve SEM kullanılarak analiz edilmiştir. Alümina top üzerindeki izler, optik mikroskop ile incelenmiştir. Deney sonuçları özetlenecek olursa;

Şekil 2.25 ve 2.26, numuneler üzerinde ve Alümina top üzerinde oluşan aşınma izlerini göstermektedir.

Hava ortamında yapılan aşınma testlerinde uygulanabilecek maksimum yük 4,5 N olarak bulunmuştur. Bu yük değlerinin üstünde, SiC_p yüzeylerden fazlaca aşınmaya uğrayıp, alumina top yüzeyine büyük bir malzeme transferi meydana gelmiştir.

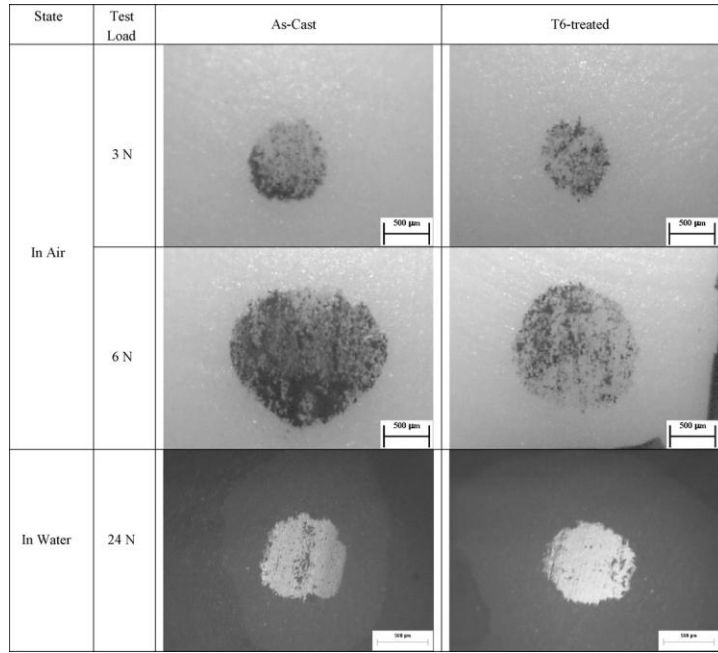
Su ortamında yapılan aşınma test sonuçlarında 18-24 N arası yüklerde, hava ortamındaki 4,5 N luk etki çok benzer bir şekilde görülmüştür. Alumina top yüzeyinde önemsizmeyecek kadar bir miktarda malzeme transferi gözlemlenmiştir. Aşınma testleri, şiddetli ve ortalama koşullarda olmak üzere iki farklı koşullarda yapılmıştır.



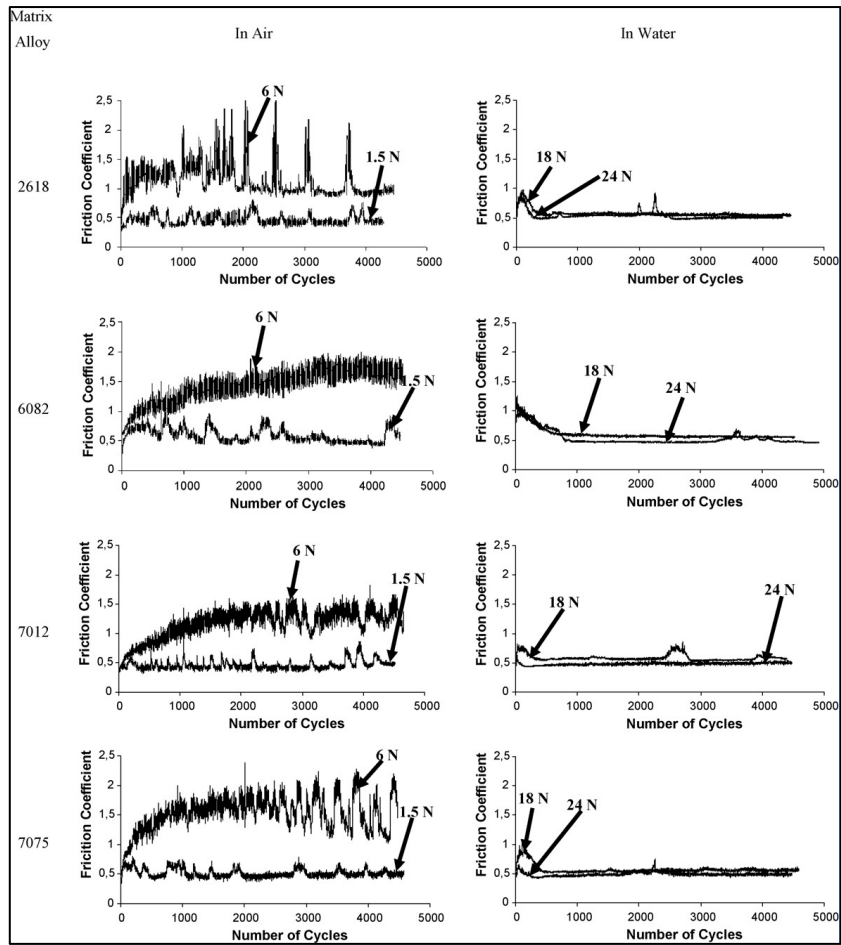
Şekil 2.25 : Sıkıştırma dökümle üretilmiş ve T6 ısıtıl işlemi yapılmış 2618 Al alaşım numunelerinin üzerinde su ve hava içerisinde yapılmış aşınma testlerinde oluşan görüntüler [20].

Hava ortamında yapılan aşınma testlerinde uygulanabilecek maksimum yük 4,5 N olarak bulunmuştur. Bu yük değerinin üstünde, SiC_p yüzeylerden fazlaca aşınmaya uğrayıp, alumina top yüzeyine büyük bir malzeme transferi meydana gelmiştir.

Şekil 2.27 aşınma testleri sonucunda ortaya çıkan sürtünme kuvveti değerlerini ortaya koymaktadır.



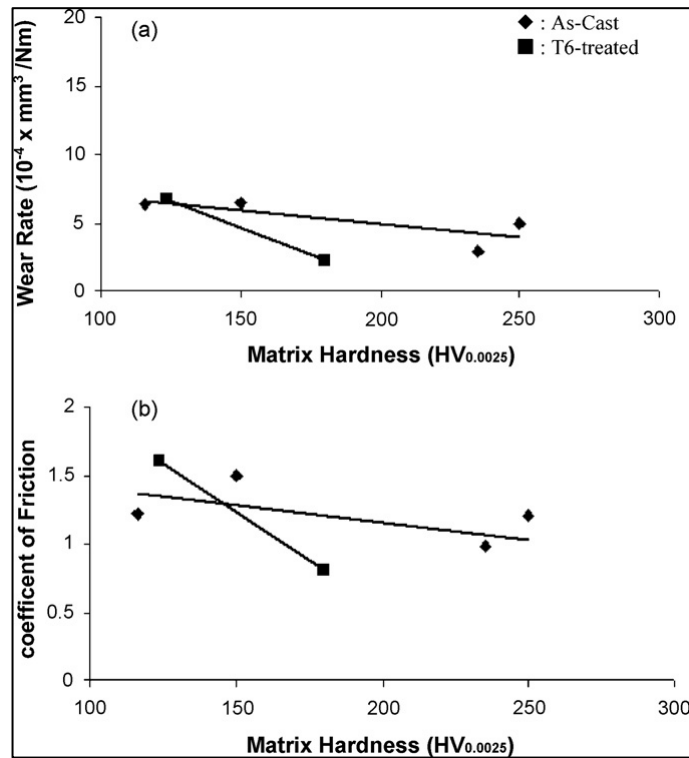
Şekil 2.26 : Aşınma testlerinde kullanılan Al_2O_3 aşındırıcı top üzerinde oluşan aşınma izleri [20].



Şekil 2.27 : Aşınma testlerine bağli olarak oluşan sürtünme kuvvet değeri [20].

Sürtünme kuvveti grafiklerinde, hava ortamında yapılan testlerin grafiklerinde büyük dalgalanmalar görülmektedir. Bu dalgalanma, yük değerleri azaltılarak giderilmiştir. Hava ortamında, sabit koşullardaki sürtünme kuvveti, 0,4 ile 1,8 arasında değişmektedir.

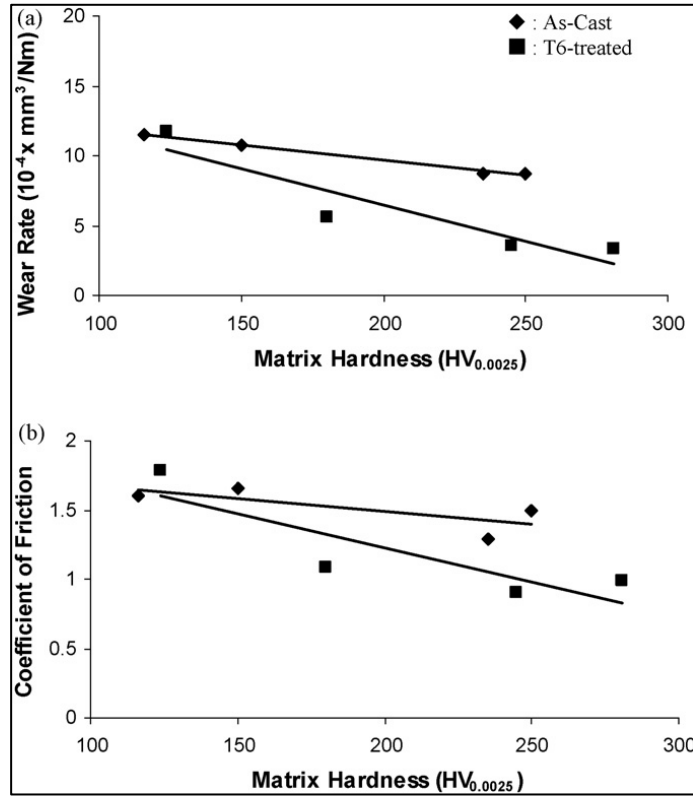
Su içerisinde yapılan aşınmalar sonucu, sürtünme katsayısı maksimum değer olarak 1,0'a ulaşır; 0,4 değerinde sabitlenmiştir. Çok yüksek yüklemelerde bile grafikler üzerinde büyük dalgalanmalar görülmemektedir. Şekil 2.28 ve şekil 2.29 şiddetli aşınma testlerindeki matris sertliğinin aşınma hızı üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlardan anlaşılabacağı üzere, artan matris sertliği ile beraber, sürtünme kuvveti azalmaktadır. Aşınma testleri sonucunda SiC_p partiküllerinin yüzeylerden çıkmasından dolayı, bu partiküllerin matrisi alüminanın aşındırıcı etkisinden tam olarak koruyamadığı belirtilmiştir. Bununla beraber, SiC_p'lerin aşınma sonucu kalkması ile beraber matris sertliği artmıştır ve daha yüksek aşınma direnci gözlemlenmeye başlanmıştır.



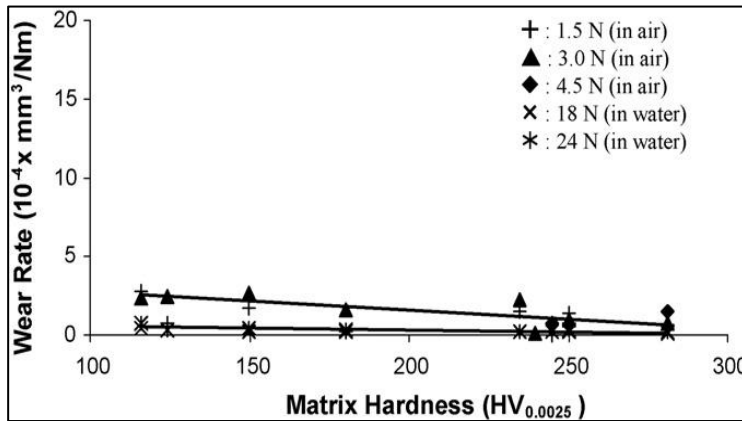
Şekil 2.28 : Matris sertliğinin 4,5 N altında yapılan aşınma testlerindeki a) aşınma hızı ve b) sürtünme katsayısına etkisi [20].

Şekil 2.30 ve 2.31 ise, ortalama koşullarda yapılan aşınma testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Hava ortamında aşınma hızı ve sürtünme direnci, artan matrisle beraber düşmektedir. Su içerisinde ise, tribolojik herhangi bir değişim

görülmemektedir. SiC_p partikülleri yüzeyde kalıp alumina üzerine transfer gerçekleşmemiştir. Düşük aşınma hızı ve sürtünme katsayısının büyük ölçüde SiC_p partikülleri ile ilgili olduğu belirtilmiştir.



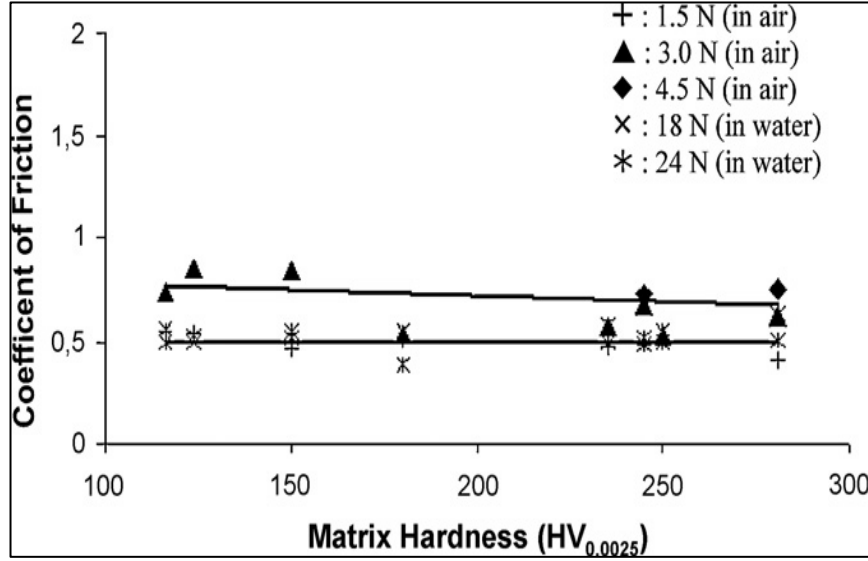
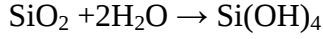
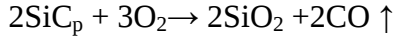
Şekil 2.29 : Matris sertliğinin a) aşınma hızına ve b) 6N’luk yük altında oluşan sürtünme kuvvetine etkisi [20].



Şekil 2.30 : Matris sertliğinin şiddetli yükler altında oluşan aşınma hızına etkisi [20].

Şekil 2.30 ve 2.31’de görüldüğü üzere, kompozitler su içerisinde daha düşük aşınma hızı ve sürtünme katsayısına sahiptir. SiC_p seramiklerinin aşınma davranışlarının kontrolü arayüzeyde silisyum oksit ve hidroksit filmlerinin oluşumuna bağlı olup; bu

filmler sürtünme kuvveti ve aşınma hızını azaltmasına sebep olmaktadır. Yapılan Raman spektroskopisine göre; kompozit ve alumina top arasındaki ara yüzeyde SiO_2 ve $\text{Al}(\text{OH})_3$ oluşumu kompozit ve yağlayıcı etki göstermiş olup; aşağıdaki tepkime meydana gelmektedir.



Şekil 2.31 : Matris sertliğinin şiddetli yükler altında oluşan sürtünme katsayısına etkisi [20].

Çalışmanın sonucunda;

- SiC_p takviyeli 2618, 6082 ve 7012 alüminyum alaşımlarının şiddetli ve ortalama aşınma testleri gerçekleştirilmiş olup; şiddetli aşınma testinde SiC_p partikülleri yüzeylerden kalkmıştır. Ortalama aşınma testlerinde yüzeyde kalabilmiştir. Hava ortamındaki aşınma testlerinde maksimum 4,5-6N yüklere, su içerisinde maksimum 24 N'luk yüklere çıkılabilmektedir.
- Su içerisindeki testler çok daha düşük aşınma hızı ve sürtünme katsayısı göstermiştir [20].

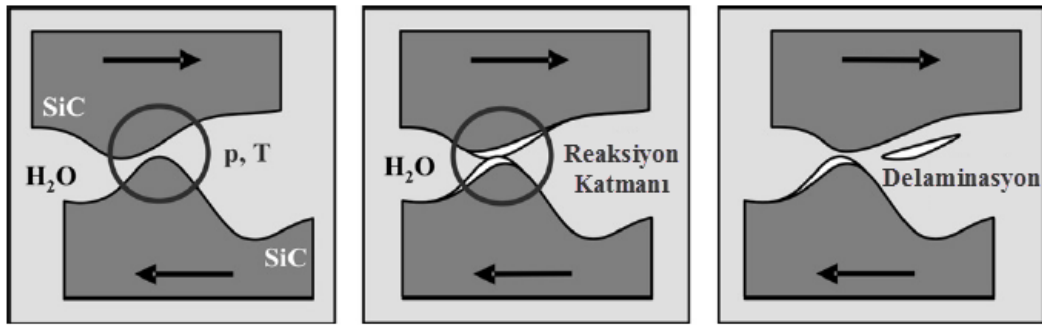
2.3 Sinterlenmiş SiC_p 'ün Özellikleri ve Sulu Ortamdaki Davranışları

Sinterlenmiş SiC_p düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve elastik modüle sahip olmaları, kimyasal olarak inert yapıda olmaları ve yüksek sıcaklıklarda bile kararlı yapıda kalabilmeleri sebebiyle eşsiz tribolojik özelliklere sahiptir. Bu özelliği sayesinde,

valf komponentleri, pompa keçeleri gibi birçok kullanım alanı olup, rulmanlar, piston halkaları, mekanik keçeler gibi aşınmanın önemli olduğu alanlarda da kullanılmaktadır [21].

SiC_p, sulu aşınma ortamlarında kimyasal ve mekanik olarak bozunmaktadır. Sürtünmeyle meydana gelen kimyasal aşınma, malzeme üzerinde ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu esnada SiC_p partikülleri plastik deformasyona uğramaktadır [22].

Şekil 2.32, sulu aşınma ortamında oluşan ince yağlayıcı film tabakasını göstermektedir.



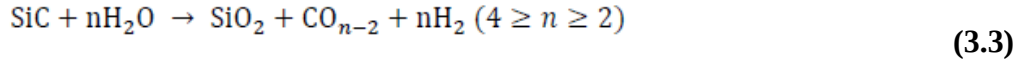
Şekil 2.32 : Tribo-kimyasal film tabakası oluşumunun şematik gösterimi [22].

Kayan SiC_p tabakaları arasında bölgesel olarak yüksek sıcaklık ve basınç değerleri meydana gelmektedir. Mekanik temas sonucu, parça kopup yüksek sıcaklık ve basınç ortamında silika ve silikaya benzer bir tabaka oluşturmaktadır. Kayma yüzeyleri de sürtünme sonucu ve tepe aşınma mekanizmalarının sonucunda düz bir yapıya kavuşmaktadır [22].

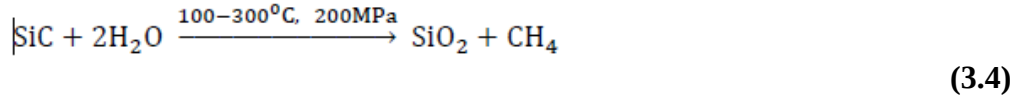
Yağlayıcı film tabasının oluşumu için aşağıdaki tribo-kimyasal reaksiyonlar öne sürülmektedir.

SiC_p yüzeylerinin sulu ortamda aşınması sonucu oluşan ince ve yağlayıcı tabakanın oluşumu 4 aşamalı olarak özetlenmiştir. Denklem 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'te bu aşamalar görülmektedir.





Yapılan deneyler sonucunda, Su ve silisyum karbür molar oranının 2:1 olmasından çok az önce, SiC_p kararlı bir yapı hale gelir; karbon ise istikrarsızlaşır. Bundan dolayı, orta seviyedeki sıcaklıklarda (100-300°C, 200 MPa) metal gazının oluşum reaksiyonunun meydana gelmesi mümkündür [22].



1.Aşama: İdeal olmayan hidro-dinamik ortamındaki temaslarda, pürüzlü yüzeylerdeki çıkıntılar kırılır ve bu kırılma yüksek sıcaklık ve basınç koşullarını meydana getirmektedir.

Darbe etkisiyle oluşan çökme sonrası, SiC_p yapısal olarak parçalanıp küçük kristallere ayrılarak aşınma birikintileri oluşturmaktadır. Oluşan birikintilerin, bir bölümü su tarafından taşınırken diğer bir bölümü suyun hidro-termal açıdan saldırısına maruz kalmaktadır. Daha sonra, çatlak yüzeylerinde ve başka yüksek gerilimli bölgelerde, gaz ve silika oluşum reaksiyonu başlamaktadır.

2. Aşama: 2. aşamada devam eden mekanik temas sonucu, büyük bir bozunma ve kayma çatlakları oluşur.

Buradaki çatlaklar yüksek basınca maruz kalıp; mekanik temas ile oluşan enerji ısıya dönüşmekte ve bu ısı belli bölgeleri yüksek sıcaklıklara çıkartmaktadır.

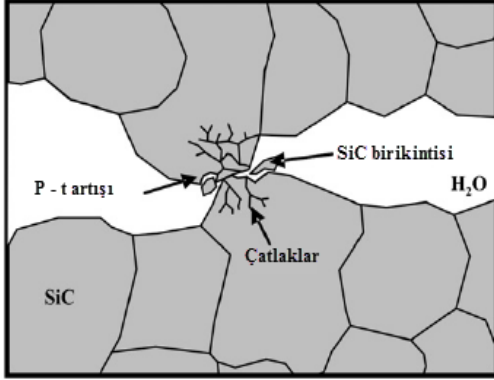
3. Aşama: Bir önceki aşamalarda oluşan temas sonucu yükselen sıcaklık bir denge sıcaklığına ulaşır.

Çatlakların mekanik olarak açılıp kapanır ve aşınma sonucu oluşan yığınlar bu boşluklara dolmaktadır.

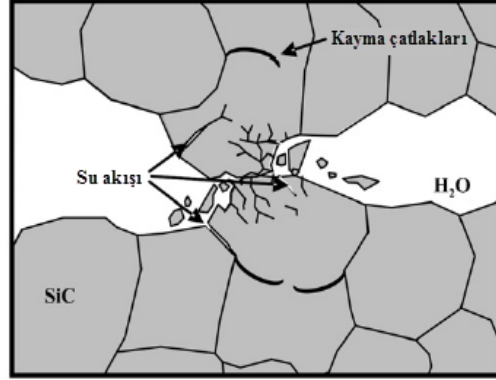
Daha sonrasında, (3.3) formülüne göre; silika oluşur ve silika zengin ıslak faz (SiO_xHy), sürtünme yüzeyindeki boşluklara tutunur.

4. Aşama : Ara yüzeylerde, mekanik temaslardan dolayı daha düzgün aşınma izleri oluşur. Sürtünme yüzeyleri arasına hapsolan aşınma yığınları, nano boyutlara ulaşarak oval bir şekil alır. Silika, yağlayıcı aşınma tabakasının ana malzemesini

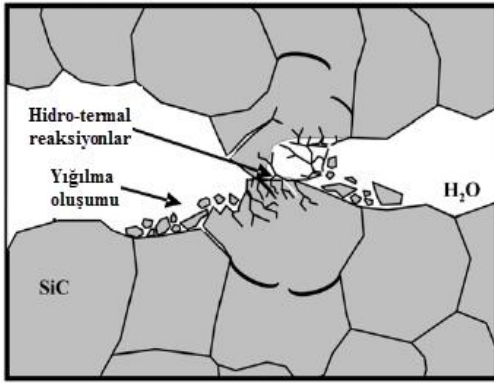
oluşturur. Nano boyutlardaki aşınma birikintileri, SiC_p arasındaki uygun boşluklara yerleşip; su ile yapıdan uzaklaşmasını engeller [22].



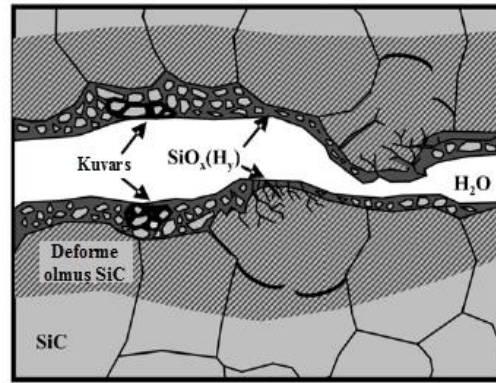
(a) 1. Aşama



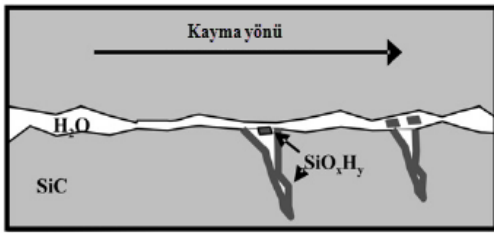
(b) 2. Aşama



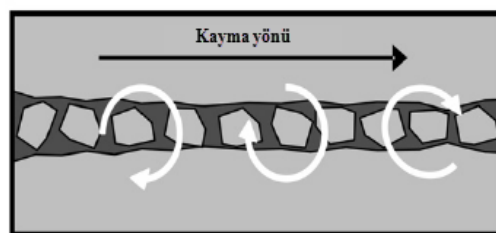
(c) 3. Aşama



(d) 4. Aşama



(e) Aşınma ara yüzeyi



(f) Aşınma ara yüzeyi

Şekil 3.2 : SiC_p 'nin sulu ortamdaki aşınma davranışının şematik gösterimi (a) ilk temas ve birikinti oluşumu (b) temasin devamı ve kayma çatlaklarının oluşumu (c) hapsedilmiş su ve hidro-termal reaksiyonlar (d) izin düzleşmesi ve boşlukların dolması (e) silikanın dönüşümü, çözünmesi ve çökmesi (f) silika aşınma parçacıklarının yuvarlanması, ufalanması ve bozunumu.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Alüminyum 12 Silisyum (Al12Si) ve SiC_p tozları kullanılarak soğuk gaz dinamik püskürtme (SGDP) yöntemi Al 1050 kalitede altlık üzerine kaplanmıştır. Kaplama sonrası karakterizyon çalışmaları; optik mikroskop ve X ışınları difraktometresi, mikrosertlik ölçümleri ve aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir.

3.1 Kaplama

Altlık malzemesi olarak 1050 kalitede Alüminyum kare profil çubuk malzeme kullanılmıştır. Kaplanacak numuneler 40 mm x 80 mm ölçülerinde olacak şekilde kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir.

Kaplama tozları Alfaesar markalı, küresel yapıda ve -325 mesh Al-12Si matris malzemesi ile Alfaesar markalı, düzensiz yapıda ve -325 mesh SiC_p takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaplama tozu hacimce aşağıdaki çizelgede belirtilen oranlarda karıştırılmıştır ve aynı oranlarda toplamda 7 numune hazırlanmıştır. Kaplama, RUSONIC™ markalı soğuk gaz dinamik püskürtme sistemi ile manuel olarak yapılmıştır. Kullanılan cihaz şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere, portatif tipte kaplama sistemi kullanılmıştır.

Sistemde, taşıyıcı gaz olarak hava kullanılmış ve basıncı 6 bar olarak ayarlanmıştır. Nozül ucu ve kaplama arasındaki mesafe 10 mm olarak ayarlanmış; toz besleme hızı cihazdaki hız ayarına göre 5/8 olarak belirlenmiştir. Kaplama esnasındaki sıcaklık yaklaşık 500 °C olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.1 : Kaplama tozlarının hacimce içeriği.

	1	2	3	4	5	6	7
% SiC _p	0	5	10	15	20	25	30
%Al12Si	100	95	90	85	80	75	70



Şekil 3.1 : RUSONIC™ markalı soğuk gaz dinamik püskürtme cihazı.

3.2 Karakterizasyon Çalışmaları

Karakterizasyon çalışmaları sırasında; XRD analizleri, mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümlerini içermektedir. Kaplamalarda oluşan fazların analizi için; şekil 3.2'deki Philips markalı PW3040 cihazı ile X ışınları difraksiyonu analizi yapılmıştır. $2\theta = 10-90^\circ$ arasında XRD paternleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.2 : Philips marka XRD cihazı.

Kaplanmış numuneler, kesitleri üzerinden mikroyapı incelemelerinin yapılması için öncelikle metalografik olarak hazırlanmıştır. Numuneler sırası ile 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500'lük zımparalar ile düzeltilmiştir.

Zımparalanan numuneler, daha sonra çuha üzerinde silika ve yağlayıcı kullanılarak parlatılmıştır.

Mikroskopik incelemeleri için şekil 3.3'te verilen Leica Marka optik mikroskop ve şekil 3.4 'te verilen taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 3.3 : Leica markalı optik mikroskop.

Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler üzerinden kaplamaların sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri şekil 3.5'te belirtilmiş Shimadzu™ marka HMV-2 model mikro sertlik cihazı kullanılarak, 25 gr yük altında 15 sn uygulama ile Vickers cinsinden yapılmıştır. Her bir numune için ortalama 15 ölçüm yapılmıştır.



Şekil 3.4 : Hitachi™ marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu.



Şekil 3.5 : Shimadzu™ marka HMV-2 mikrosertlik ölçüm cihazı.

3.3 Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri ileri-geri hareketli yükleme koşullarında şekil 3.6’te gösterilen TRIBOTECH™ marka salınlımlı aşınma cihazında yapılmıştır. Deney öncesinde numunelerin yüzeyleri zımpara ile düzeltilip; hassas kesme cihazında kesilmiştir. Kesilen numuneler ve aşındırıcı top alkol ile temizlenmiştir.

Aşınma deneylerinde, aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında alumina (Al_2O_3) bilya kullanılmıştır. Aşınma deneleri; 1, 2, 3, 5 N yük altında, 10 mm/sn kayma hızında gerçekleştirilmiştir. İz uzunluğu (strok) 5 mm ve kayma mesafesi 30000 mm olarak ayarlanmıştır.

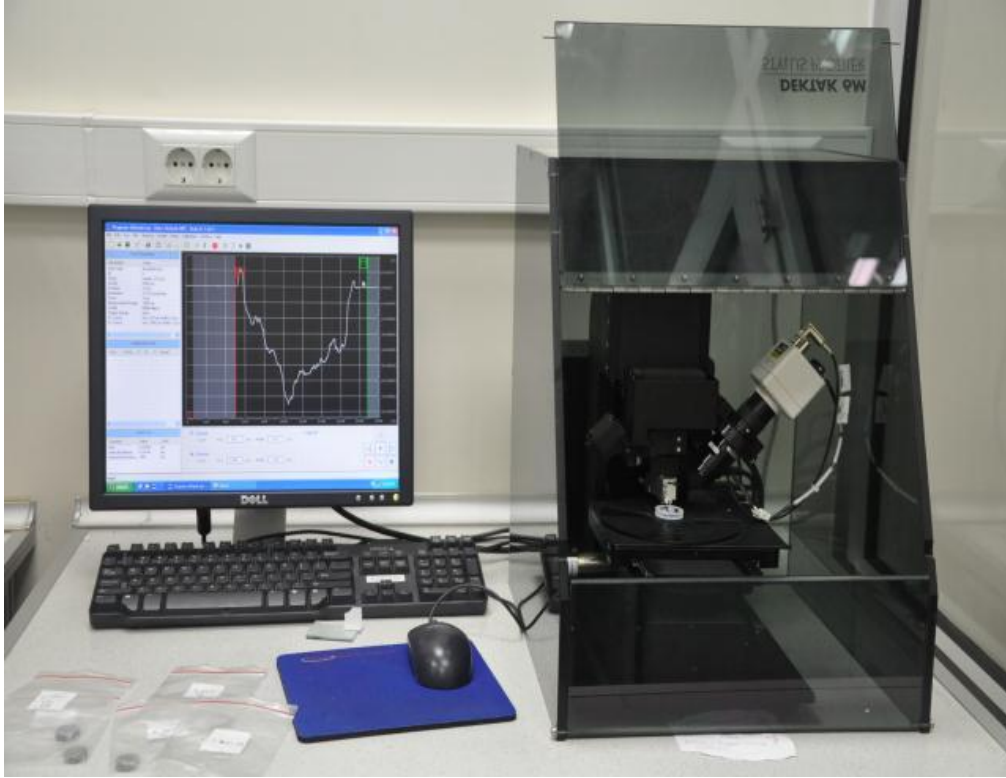
Aşınma deneyleri sırasında sürtünme kuvveti ve katsayısı bilgisayar kullanılarak kaydedilmiştir. Farklı hacimlerdeki tüm numuneler saf sulu ortamda aşındırılmış ve ek olarak % 25 SiC_p takviyeli numune kuru ortamda aşındırılmıştır. Kullanılan saf suyun pH’ı 5.5 ve iletkenliği 44 ms / cm’dir.



Şekil 3.6 : TRIBOTECH™ marka salınlımlı aşınma cihazı.

Aşındırılan numunelerin yüzey profilleri Dektak 6M cihazında ölçülmüştür (şekil 3.7). Elde edilen yüzey profillerinden aşınma iz alanları hesaplanmıştır. Numunelerin

ve topun temas yüzeyleri optik mikroskop ile (şekil 3.3), aşınma izleri SEM (şekil 3.5) ile incelenmiştir.



Şekil 3.7 : Dektak 6M iğneli yüzey profil cihazı.

Aşınma iz alanları, cihazdan elde edilen profillerdeki genişlik ve derinlikler üzerinden 3.5 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A=(\pi/4).G.D \quad (3.5)$$

3.4 FTIR Analizleri

Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği ile kaplanan numunelerden %100 Al₁₂Si içeren kaplama üzerine ve % 30 SiC - % 70 Al₁₂Si içeren kaplamalar üzerinden FTIR analizi yapılmıştır. FTIR analizi ile, kaplanmış numuneler 2 hafta saf su içerisinde bekletilmiş; daha sonrasında numunelerin moleküler bağ karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve su içerisinde meydana getirebileceği tepkimeler sonucu oluşan bağları incelenmiştir.

Analizler, Bruker™ Alpha-T Fourier Transform Infrared Spektrometresi (FTIR) kullanılarak (Şekil 3.8) yapılmıştır.

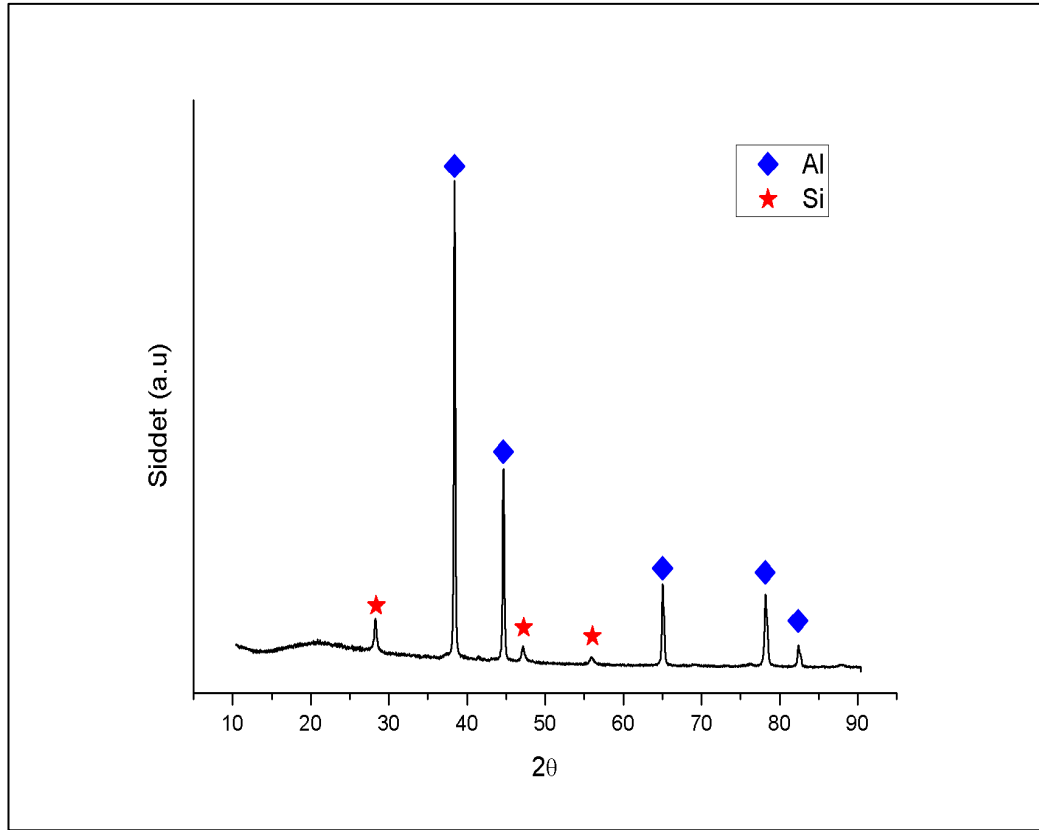


Şekil 3.8 : BrukerTM Alpha-T Fourier transform infrared spektrometresi.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

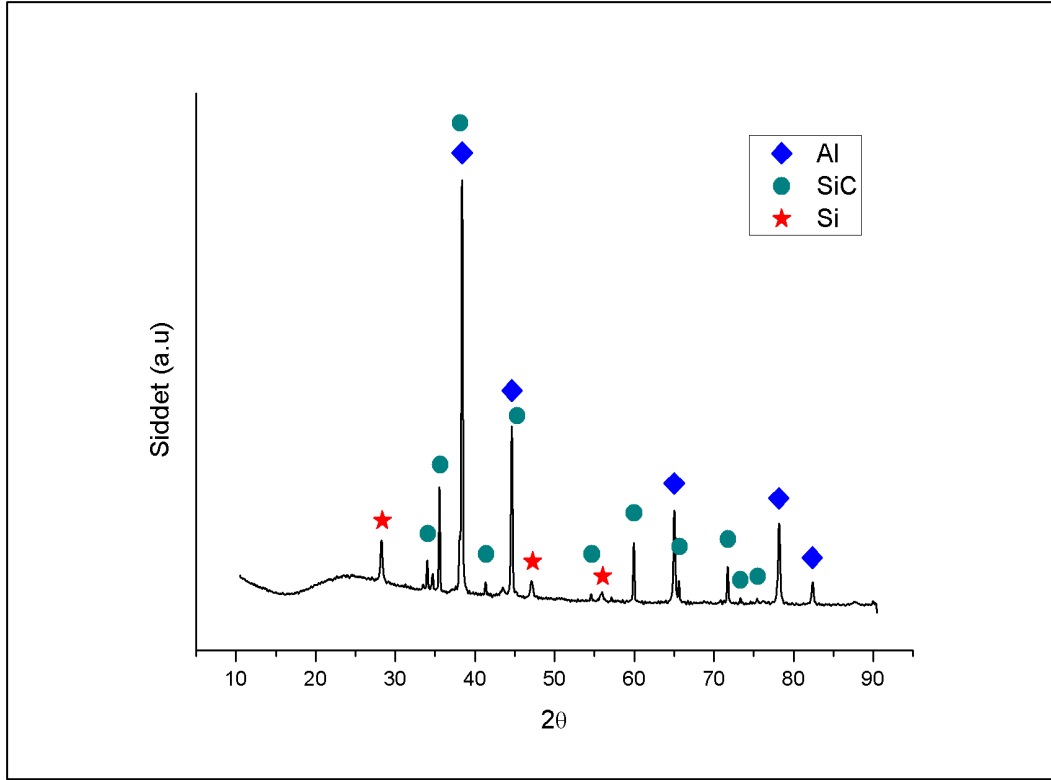
4.1 Karakterizasyon Sonuçları

Soğuk gaz dinamik püskürtme ile kaplanmış Al 1050 numunelerinde oluşan fazların tayini için X-ışını difraksiyon analizi yapılmıştır. $2\theta = 10-90^\circ$ arasında çekilen XRD paternleri Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’de görülmektedir. XRD ölçümleri, hacimce %100 Al12Si, % 15 SiCp- % 85 Al12Si, %30 SiCp- %70 Al12Si kompozisyonlarında kaplanmış numuneler üzerinden yapılmıştır.



Şekil 4.1 : %100 Al12Si içerikli numune üzerinden çekilen XRD paternleri.

Öncelikle, %100 Al12Si ile kaplanmış numuneler üzerinden XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan XRD ölçümleri sonucunda (şekil 4.1), matris malzemelerinden sadece Alüminyum ve Silisyum piklerine rastlanmıştır ve kaplamanın başarıyla yapıldığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.2 : %15 SiC_p-%85 Al-12Si içerikli numune üzerinden çekilen XRD paternleri.

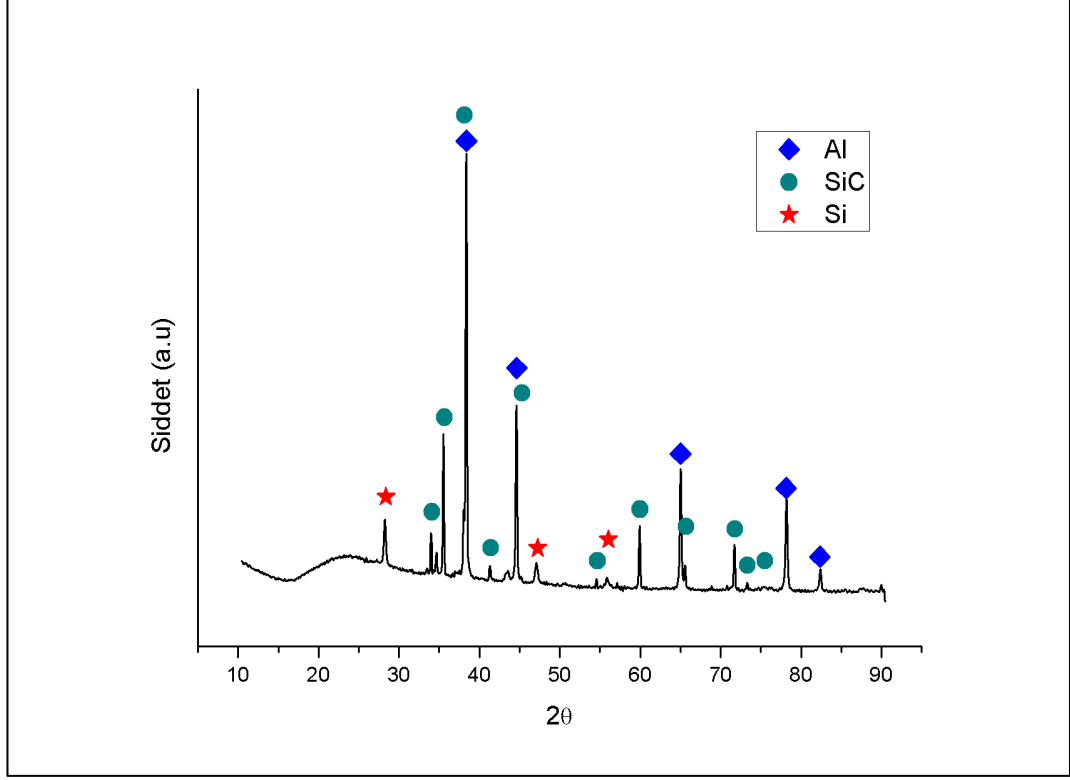
%15 SiC_p içerikli numune üzerinden yapılan XRD analizine (şekil 4.2) bakıldığında, Al ve Si fazları ile beraber SiC_p takviye malzemelerinin fazları da oluşmuştur.

%30 SiC_p içerikli numune üzerinden yapılan XRD analizlerinde (şekil 4.3) de bir önceki XRD analizinde olduğu gibi Al ve Si pikleri ile birlikte SiC_p piklerinin olduğu görülmüştür. Tüm sonuçlardan anlaşılabileceği üzere, kaplamanın içerdiği tozlar aynı zamanda XRD piklerinde ortaya çıkmış ve kaplamaların altlık malzeme üzerinde başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği anlaşılmıştır. SiC_p, Al ve Si pikleri dışında herhangi bir faz görünmemesi, SGDP ile üretilen kaplamalarda işlem sonrasında herhangi bir faz dönüşümü, kimyasal reaksiyon ve yeni bir ürün oluşmadığını göstermektedir.

Kaplanan numunelerin her biri bakelite alınmış, yüzeyleri metalürjik olarak hazırlandıktan sonra mikroyapıları incelenmiştir. Şekil 4.4'te optik mikroskop kullanılarak alınan görüntüler verilmiştir.

Kesitten alınan 100x büyütmedeki optik mikroskop görüntülerindeki siyah bölgeler SiC_p'e aittir. Görüntülerden anlaşılabileceği üzere, SiC_p takviyeleri, Al12Si matris içerisinde homojen olarak dağılmıştır.

Optik mikroskop görüntüleri, tüm kompozisyonlardaki SiC_p seramiklerinin altlık malzemeye sıkıca bağlandığını, bağlanırken herhangi bir süreksizlik göstermediğini ve kaplamaların düşük poroziteye sahip olduğunu kanıtlamaktadır.



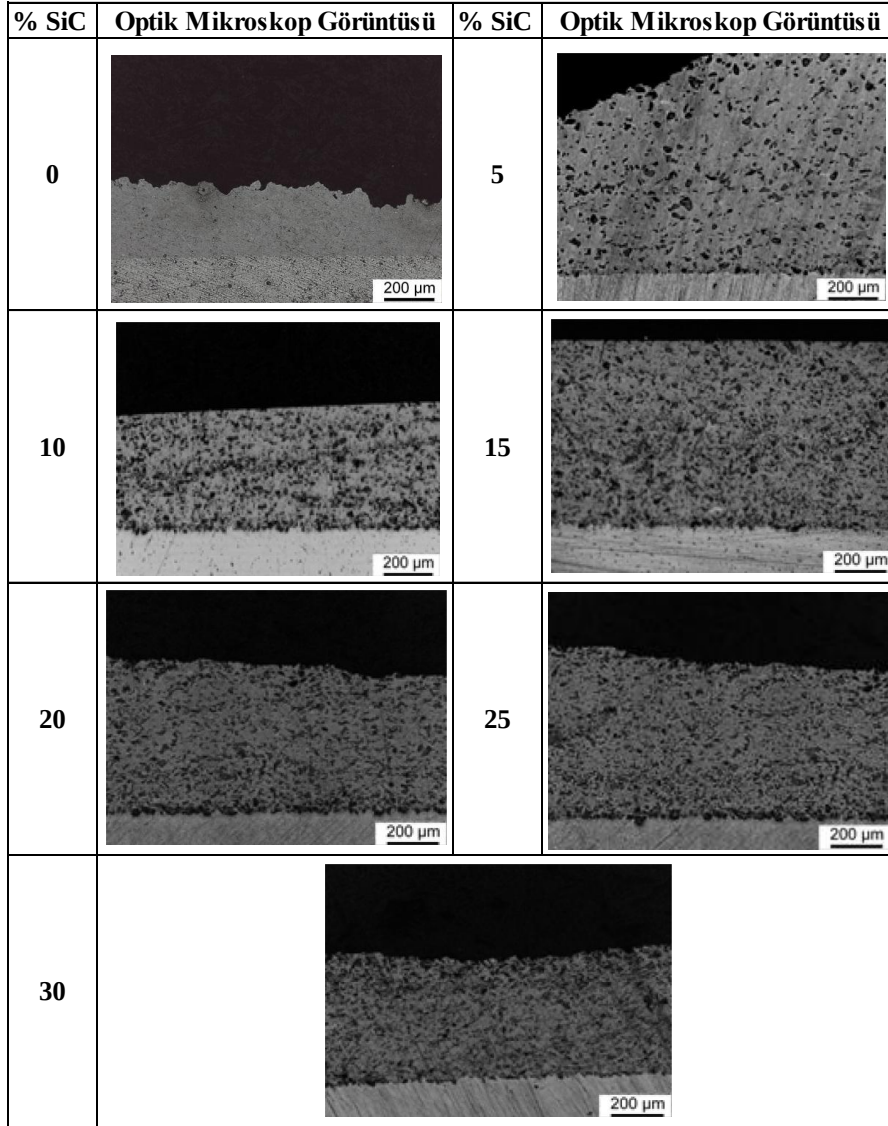
Şekil 4.3 : %30 SiC_p-%70 Al-12Si içerikli numune üzerinden çekilen XRD paternleri.

Yapılan literatür çalışmalarında [14], sadece Al₁₂Si kullanıldığı zaman; kaplamada Al altlığa tekrar bir Al taneciği çarptığında kaplama boşluklu bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir. % 100 Al₁₂ Si kaplı numunelerde, seramik sayesinde oluşabilecek deformasyon meydana gelmemiştir. Kaplama tozu içerisinde seramik partikülü kullanıldığı zaman, yüzeye yapışmış olan Aluminyum tozları üzerine yapışıp, deformasyon oluşmuş yüzeyi daha fazla deforme etmektedir. Görüntülerden anlaşılacağı üzere, altlık malzeme Al₁₂Si tarafından deforme olmuş ve SiC_p partikülleri matris tozlarının içerisinde gömülmüştür.

Görüntülerde, birleşme bölgelerinde dümdüz bir ara yüzey görülmemektedir. Bunun sonucunda, altlık ve kaplama malzemelerinin birbirlerini tek bir yapı olarak tamamladığı söylenilebilir.

Farklı kompozisyonlarda elde edilen kaplamaların altlık malzemeye penetrasyonu oldukça iyi görülmektedir. Kaplama altlık ara yüzeyine sıkıca bağlanmış olup;

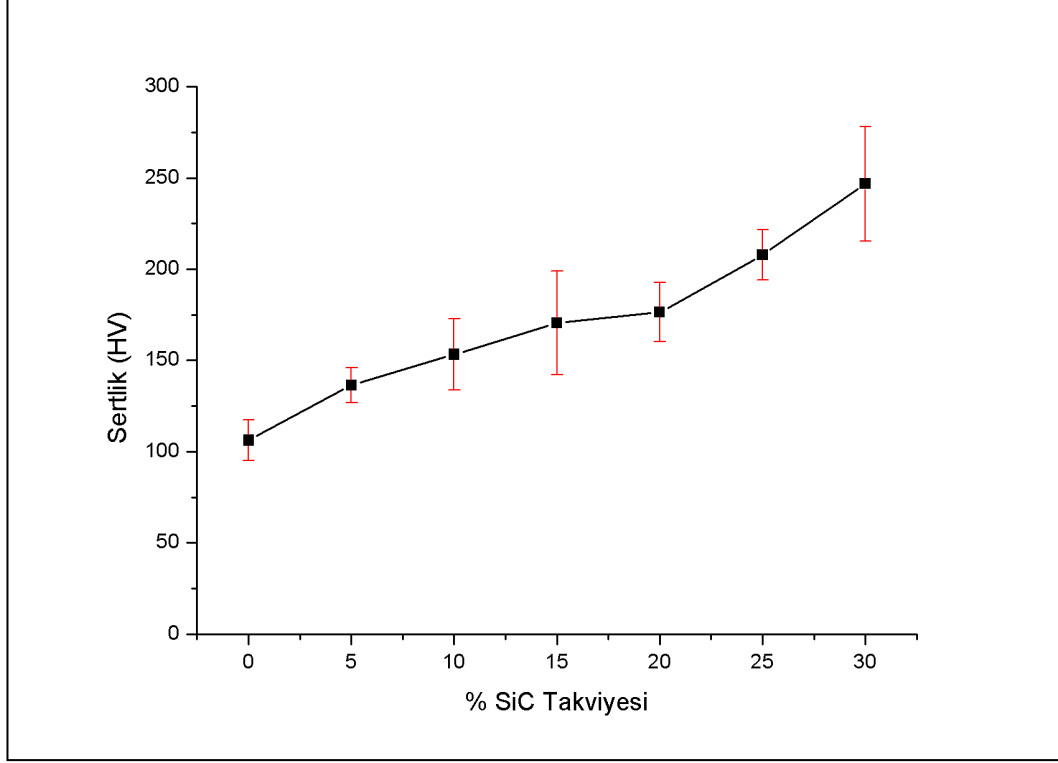
herhangi bir süreksizlik içermemektedir. Hacimce daha fazla SiC_p kullanıldığı takdirde, partiküllerinin altlık malzeme içerisinde ilerlediği ortaya çıkmıştır. Kaplamalardaki boşluklar oldukça düşük seviyede gözükmemektedir.



Şekil 4.4 : Kaplama sonrası alınan optik mikroskop görüntüleri.

Sertlik ölçümleri hacimce farklı SiC_p kaplanmış numuneler üzerinden 25 g yük altında yapılmıştır. Deneysel hataların en aza indirilmesi amacıyla her bir numune için en az 15 ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin istatistiksel ortalaması alınmıştır. Çalışmanın başında hedeflendiği üzere, Kaplama içerisindeki SiC_p oranı arttıkça, kaplamanın sertliğinde artış görülmektedir. %100 Al₁₂Si'nin sertlik değeri ortalama 108 HV, %5SiC_p-%95 Al₁₂Si'nin sertlik değeri 136 HV, %10SiC_p-%90 Al₁₂Si'nin sertlik değeri 153 HV, %15SiC_p-%85 Al₁₂Si'nin sertlik değeri 171 HV, %20SiC_p-%80 Al₁₂Si'nin sertlik değeri 198 HV, %25SiC_p-%75 Al₁₂Si'nin sertlik değeri 219

HV, %30SiCp-%70 Al12Si'nin sertlik değeri 247 HV olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sertlik değerleri istatistiksel olarak değerlendirildikten sonra, ölçüm sonuçları standart sapmalar ile beraber şekil 4.5'te belirtilen grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 4.5 : Kaplanmış numunelerin içerdikleri takviye (SiC_p) oranına bağlı olarak çizilmiş sertlik değerleri.

4.2 Aşınma Deney Sonuçları

Soğuk gaz dinamik püskürtme ile kaplanan tüm numuneler saf su içerisinde ve ek olarak %25 SiC_p takviyeli numune kuru ortamda aşınma deneyine sokulmuştur. Aşınma testleri sırasında bilgisayar yardımıyla sürtünme katsayı değerleri , testler sonrasında aşınma profilleri, aşınma kayıpları tayin edilmiştir. Çizelgede 4.1'de sulu ortamda yapılan bulunan sürtünme katsayısı ve aşınma iz alanı değerleri verilmektedir. Kararlı haldeki sürtünme katsayı değerleri aşınma testi esnasında bilgisayarın kaydettiği değerler üzerinden manuel olarak analiz edilmiştir. Aşınma alanları ise, aşındırılmış numunelerin profilometre yardımıyla aşınma yükseklik ile derinliklerinin ölçülmesiyle ve 3.5'te verilen denkleminin kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Ek 1, 2 ve 3'te ise sırasıyla aşınma deneyi sonucu bulunan tüm

sürtünme katsayısı – süre, aşınma hızı- SiC_p oranı ve aşınma profil grafikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Sulu ortamda yapılan aşınma testleri sonucu bulunan sürtünme katsayısı değerleri ve iz alanları

Kaplama İçeriği (%SiC_p)	Uygulanan Yük (N)	Maksimum Sürtünme Katsayısı	Kararlı Sürtünme Katsayısı	Aşınma Alanı (mm²)	Aşınma Hızı (mm²/N)
0	1	0,594	0,497	13547,83	13547,83
	2	0,598	0,503	25457,35	12728,68
	3	0,617	0,526	31232,81	10410,94
	5	0,641	0,54	53223,44	10644,69
5	1	0,625	0,308	889,56	889,56
	2	0,683	0,311	3594,64	1797,82
	3	0,643	0,336	8353,85	2784,62
	5	0,691	0,445	19452,97	3890,59
10	1	0,586	0,291	423,40	423,40
	2	0,645	0,286	2298,64	1149,32
	3	0,602	0,308	4671,73	1557,24
	5	0,671	0,503	19301,15	3860,23
15	1	0,623	0,273	475,24	475,24
	2	0,643	0,315	1611,27	805,64
	3	0,659	0,364	2965,78	988,59
	5	0,673	0,400	11340,74	2268,15

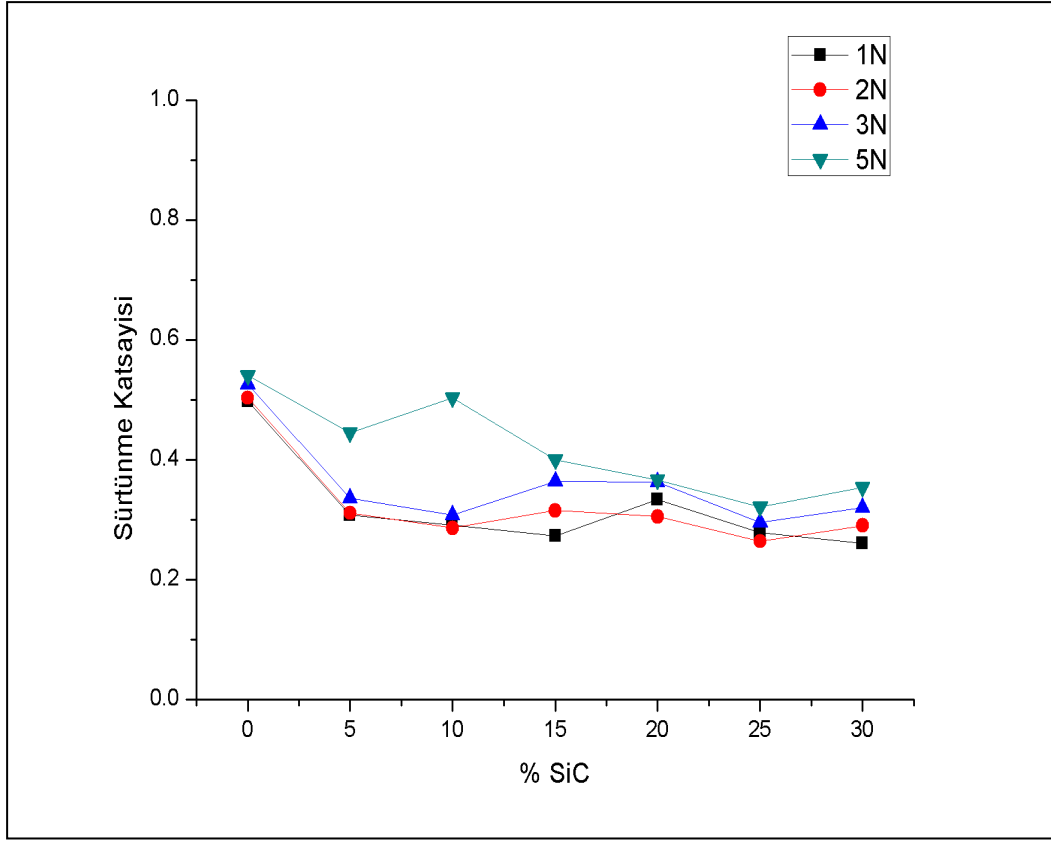
20	1	0,611	0,334	527,31	527,31
	2	0,648	0,305	4855,74	2427,87
	3	0,661	0,363	7735,66	2578,55
	5	0,699	0,366	10521,26	2104,25
25	1	0,625	0,278	418,48	418,48
	2	0,623	0,264	2196,08	1098,04
	3	0,685	0,295	2794,94	931,65
	5	0,603	0,321	8814,96	1762,99
30	1	0,581	0,260	304,96	304,96
	2	0,622	0,290	5838,61	1946,20
	3	0,642	0,320	1471,05	735,52
	5	0,654	0,354	5733,14	1146,63

Çizelgeye bakıldığında, kaplama içerisindeki SiC_p yüzdesi arttıkça, sürtünme katsayı değerlerinde azalma görülmektedir. %100 Al_{12}Si içerikli ve %5 SiC_p takviyeli kaplamanın aşınma sonuçları karşılaştırıldığında, 1, 2, 3 N deney kuvvetleri varlığındaki sürtünme katsayılarında büyük oranda düşüş gerçekleştirmiştir. 5 N'luk yüksek kuvvet altında yapılan deneylerde ise % 15 SiC_p takviyeli kaplamalardan itibaren sürtünme katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir.

Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere; 5 N'luk deney yükü varlığında, sulu ortamdaki aşınma ortamlarında yağlayıcı tabakanın kırılması için % 15 veya daha fazla SiC_p kullanılmalıdır.

Şekil 4.6'da sulu ortamda yapılmış tüm aşınma testlerinin kararlı haldeki sürtünme katsayı değerleri verilmiştir. Grafik çizelge 4.1'deki değerler baz alınarak oluşturulmuştur. SiC_p miktarı attıkça, sürtünme katsayılarında sabitleşme eğilimi görülmektedir.

Deneylerdeki test yükünün artmasıyla beraber SiC_p 'un su ortamında oluşturduğu yağlayıcı etkinin düşmesinden dolayı sürtünme katsayıları artmıştır.

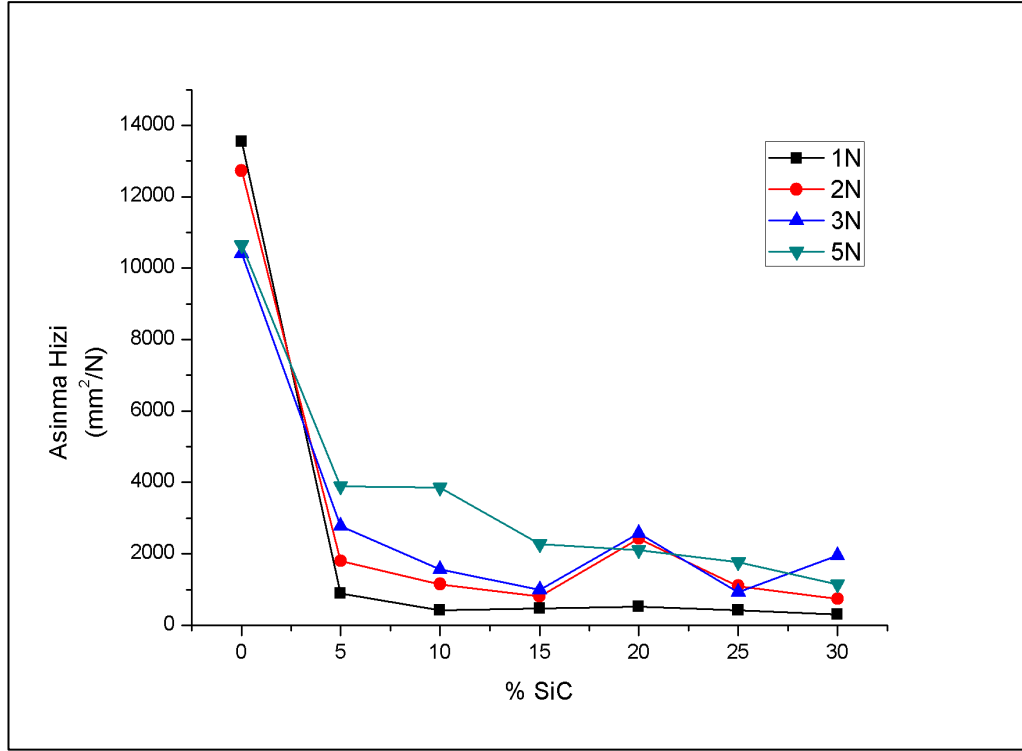


Şekil 4.6 : %SiC_p takviye miktarının su ortamındaki farklı aşınma yüklerine göre kararlı haldeki sürtünme katsayısı değerleri.

Çizelge 4.1’de belirtilmiş aşınma alanları, kaplama içerisindeki artan SiC_p oranının aşınma alanlarını azalttığını göstermektedir. SiC_p’ün oluşturduğu yağlayıcı tabaka sayesinde, aşınma testlerinde oluşan aşınma derinlik ve genişliği azalmış; aşınma alanlarında ve hızlarında da azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, aşınma deneylerindeki yük arttıkça, aşınma alanlarında da artış görülmektedir. Aşınma direncinin SiC_p katkısıyla doğru, test yüküyle ters orantılı olduğu söylenilebilir.

Şekil 4.7’de ise sulu ortam içerisinde yapılmış tüm aşınma testlerine ait aşınma hız değerleri belirtilmiştir. SiC_p takviyesiz kompozit kaplamalar tüm yükler altında daha hızlı aşınmıştır.

Grafikte takviyesiz kaplamalardan, SiC_p takviyeli kaplamaların yer aldığı bölgeye geçildiği zaman, aşınma hızında ani bir düşüş görülmektedir. Özellikle takviyesiz kaplamalardan takviyeli kaplamalara geçildiği anda aşınma hızında büyük bir düşüş görülmesi, % 5 SiC_p’ün dahi yağlayıcı etki sağladığını göstermiştir. Bununla beraber, SiC_p takviye miktarının artması ile birlikte tüm yükler altındaki aşınma hızlarında düşüş görülmüş ve birbirine yaklaşmıştır.



Şekil 4.7 : Sulu ortamdaki tüm yükler altındaki aşınma hızları.

Çizelge 4.2’de kuru ortamda yapılan aşınma testlerinin sonucunda bulunan değerler verilmiştir.

Çizelge 4.1’de verilen % 25 SiC_p takviyeli kaplamaların sulu ortamdaki değerleri ile karşılaştırıldığında sulu ortamda sürtünme katsayıları çok daha düşük seviyede kararlı hale ulaşmaktadır.

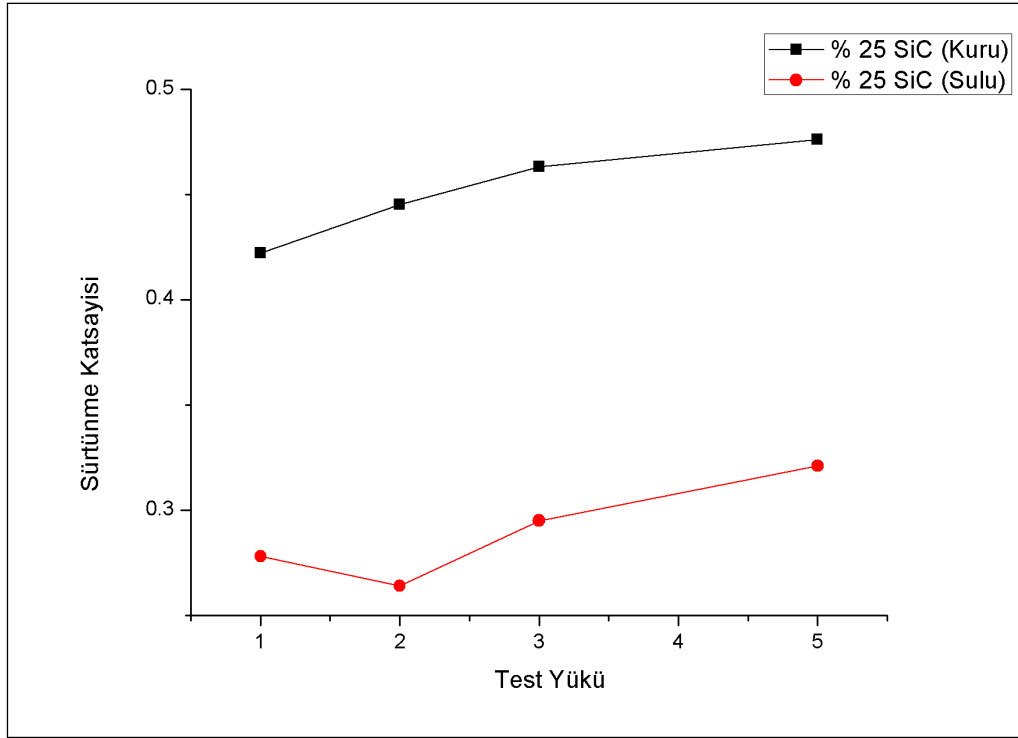
Şekil 4.8’de aşınma ortamının sürtünme katsayısına etkisi görülmektedir. Sulu ortamdaki sürtünme katsayılarında azalma görülürken, kuru ortamda SiC_p takviyesinin dahi çok büyük bir etkisi görülmemiştir. Herhangi bir yağlayıcı etki oluşmamıştır.

Değerler karşılaştırıldığında, sulu ortamda kullanılan SiC_p’ün yağlayıcı etki sağlayarak sürtünme katsayısını düşürdüğü söylenilebilmektedir. Sulu ortam sayesinde, aşınma derinlik ve genişliğinde azalma olmuş, aşınma alanında da azalma meydana meydana gelmiştir.

Sulu ve kuru ortamda yapılan aşınma testleri karşılaştırıldığında, aşınma alanlarında 1 N’luk yük altında yapılan testlerde % 90 oranında bir azalma, 5 N yük altında yapılan testlerde % 29 oranında azalma meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Yağlayıcı etki her tüm yükler altında gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2 : % 25 SiC_p takviyeli kaplamalara kuru ortamda yapılan aşınma testi sonucu bulunan sürtünme katsayısı değerleri ve iz alanları

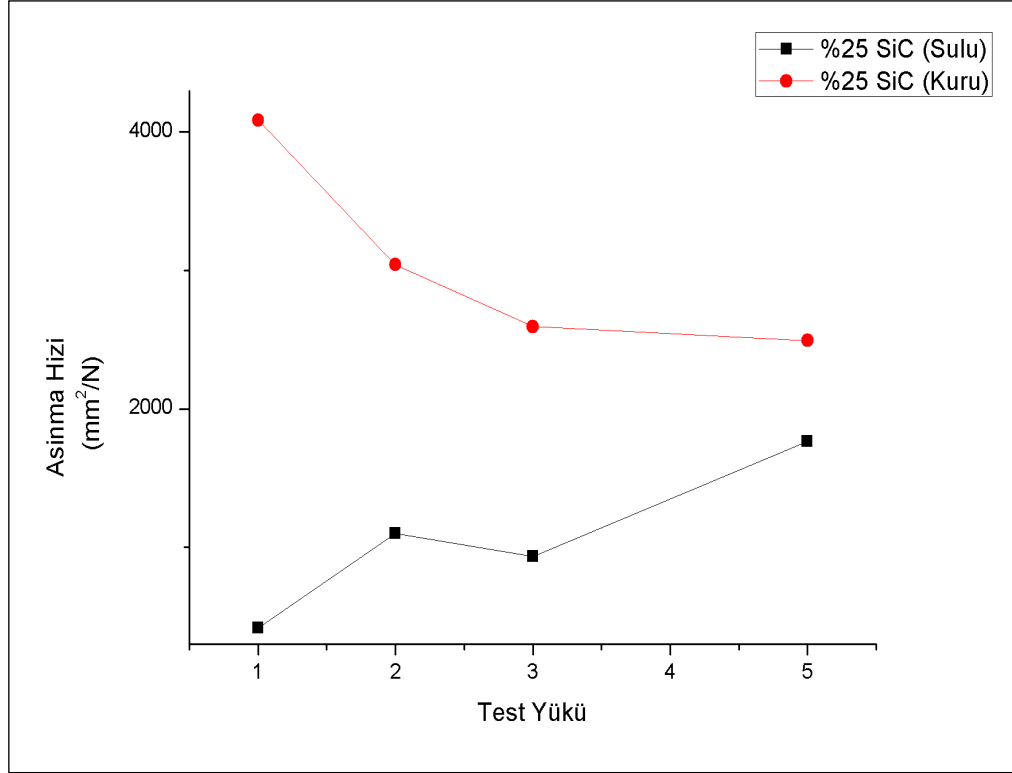
Kaplama İçeriği (%SiC _p)	Uygulanan Yük (N)	Maksimum Sürtünme Katsayısı	Ortalama Sürtünme Katsayısı	Aşınma Alanı (mm ²)	Aşınma Hızı (mm ² /N)
25	1	0,550	0,422	4084,94	4084,94
	2	0,550	0,445	6084,76	3042,38
	3	0,542	0,463	7782,68	2594,23
	5	0,554	0,476	12468,11	2493,62



Şekil 4.8 : % 25 SiC_p takviyeli kompozitlere sulu ve kuru ortamda yapılan aşınma testleri sonucu bulunan sürtünme katsayısı değerleri.

Şekil 4.9’da aşınma ortamının aşınma hızına etkisi verilmiştir. 1, 2 ve 3 N altında yapılan deneylerde sulu ortam ile kuru ortam arasındaki aşınma hızları arasında büyük ölçüde fark oluşmuştur. 5 N’luk deneylerde ise, sulu ortamdaki aşınma hızı artmış ve sulu-kuru ortam aşınma hızları birbirine yaklaşmıştır. 5 N’da sulu ortamda yağlayıcı etki oluşmuştur ancak elde edilen aşınma hız değerleri 1, 2 ve 3 N’luk

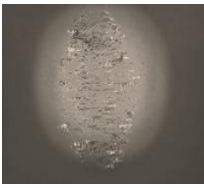
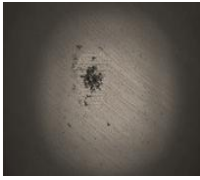
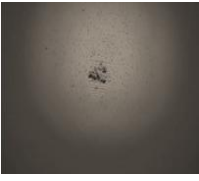
yükler altında yapılan testlerde suyun yağlayıcı etkisinin daha fazla olduğunu göstermektedir.



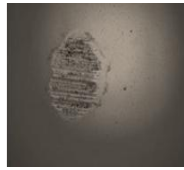
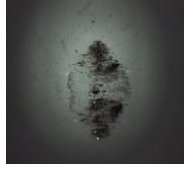
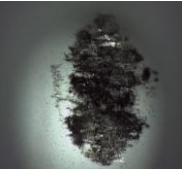
Şekil 4.9 : %SiC_p takviyeli kaplamaların sulu ve kuru ortamdaki aşınma hızları.

Şekil 4.10'da artan SiC_p oranı ve yüke bağlı olarak sulu ortamda yapılan aşınma testi sonucu, Al₂O₃ top üzerinde oluşan aşınma izleri görülmektedir. Koyu bölgeler, aşınma testi esnasında topa yapışan aşınma ürünlerini göstermektedir. Testlerde uygulanan yük miktarı arttıkça topa geçen aşınma ürünü artmakta ve daha fazla koyu bölge oluşmaktadır. Kaplama içerisindeki SiC_p oranı arttığında ise top üzerine yapışan aşınma ürünü azalmaktadır. SiC_p su içerisinde yağlayıcı etki yapmasıyla, aşınma hızını düşürmüş ve topa geçen aşınma ürününün azalmasını sağlamıştır.

Şekil 4.11'de sulu ve kuru ortam açısından karşılaştırmak amacıyla % 25 SiC_p takviyeli kaplamalar üzerinde yapılan aşınma testleri sonucu Al₂O₃ aşındırıcı bilya üzerinde oluşturulmuş aşınma izleri gösterilmiştir. Kuru ortamdaki aşınma testlerinde top üzerine çok daha fazla ve gözle görülür malzeme geçtiği, aşınma sırasında malzeme kaybının daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Sulu ortamdaki aşınma kayıpları 1, 2, 3 N'luk testlerde çok belirgin değildir, 5 N'dan itibaren belirginleşmektedir ; ancak kuru ortama nazaran daha düşük seviyede aşınma kaybı yaşandığı anlaşılmaktadır.

	Yük Değerleri			
% SiC	1 N	2N	3N	5N
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				

Şekil 4.10 : Sulu ortamda yapılan aşınma deneyi sonrasında Al_2O_3 top üzerinde oluşan aşınma izleri.

Aşınma Ortamı	Yük Değerleri			
	1 N	2 N	3 N	5 N
Sulu				
Kuru				

Şekil 4.11 : % 25 SiC_p takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1, 2, 3, 5 N yüklerinde kuru ve sulu ortamda yapılan aşınma testleri sonucunda Al₂O₃ bilya üzerinde oluşan aşınma izleri.

Şekil 4.12’de % 100 Al₁₂Si içerikli ve % 5 SiC_p, % 10 SiC_p, %15 SiC_p, %20 SiC_p, % 25 SiC_p ve % % 30 SiC_p takviyeli kompozit kaplamaların 1, 2, 3, 5 N altında sulu ortamda yapılmış aşınma testleri sonucu oluşan izlerin 1000x büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir.

Görüntülerde, SiC_p takviyesiz kompozit kaplama üzerinde oluşturulmuş aşınma izleri, SiC_p takviyeli kompozitler ile karşılaştırıldığında oldukça belirgindir.

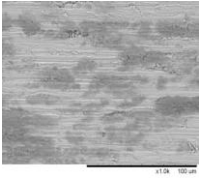
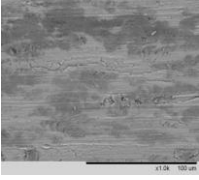
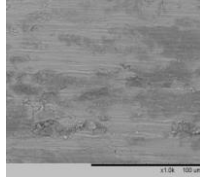
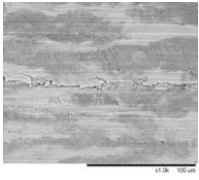
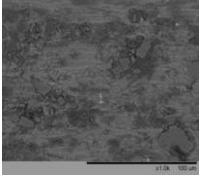
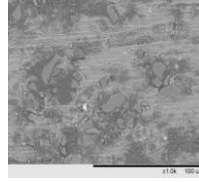
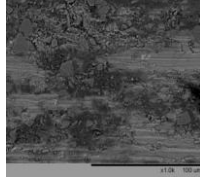
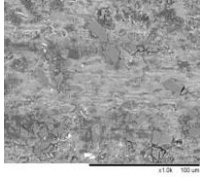
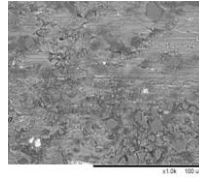
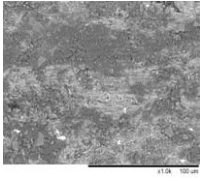
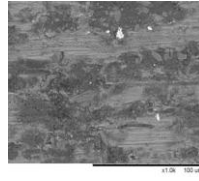
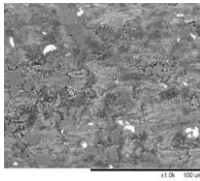
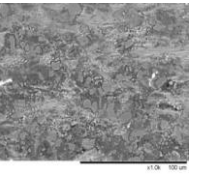
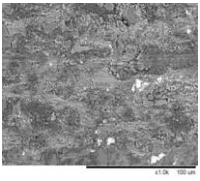
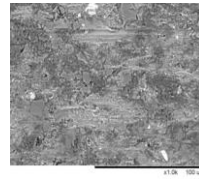
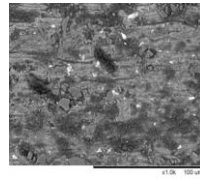
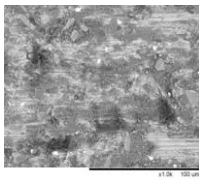
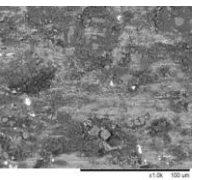
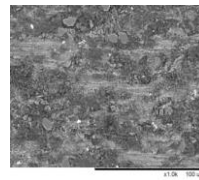
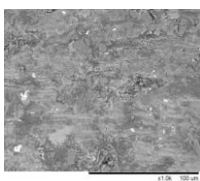
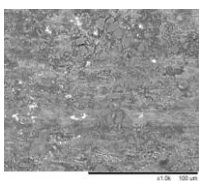
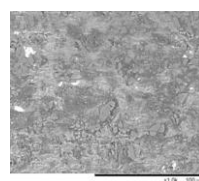
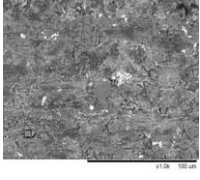
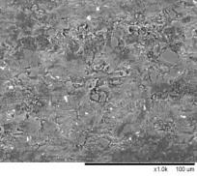
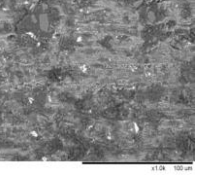
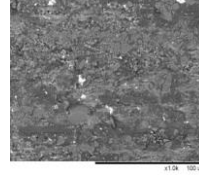
Özellikle 5 N test yükü varlığındaki aşınma deneyleri sonucu alınan görüntülerde, SiC_p takviyesiz kompozit kaplama üzerindeki aşınma izleri diğer şekillere nazaran çok daha pürüzlü ve çizikli görülmektedir. Artan SiC_p takviyesi ile beraber, kaplamaların yüzeylerindeki aşınma kayıpları gittikçe azalmaktadır.

Görüntülere bakıldığında, % 15 takviyeli kompozitlerden itibaren aşınma izlerindeki çizikler görünürlüğünü neredeyse tamamen yitirmiştir.

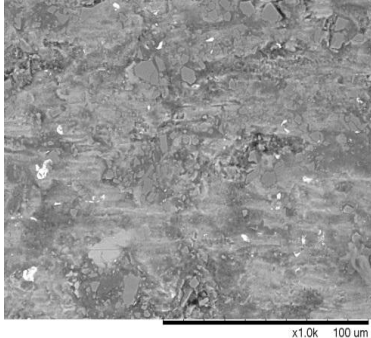
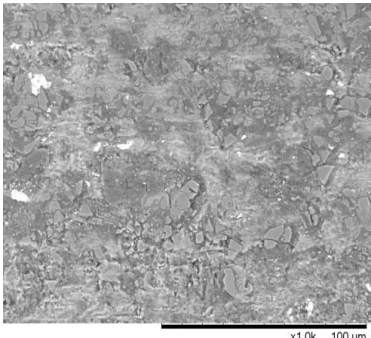
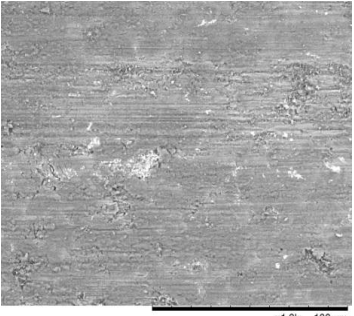
Şekil 4.13’de % 25 SiC_p takviyeli kompozit kaplamaların üzerinde 1-5 N’da sulu ve kuru ortamda yapılan aşınma testleri sonrası oluşan aşınma izlerinin 1000x büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir.

Kuru ortamda yapılan test görüntülerinde, aşınma yönünde çizikler gözükmemektedir. Sulu ortamdaki aşınma testlerinde kaplama yüzeylerinde gözle görülür bir malzeme kaybı oluşmamıştır. Sulu ortamdaki aşınma izlerinin kuru ortama nazaran daha düzgün ve pürüzsüz olduğu görülmektedir.

Sulu ortamdaki fotoğrafların daha pürüzsüz ve düzgün olması da yağlayıcı etki sayesinde.

% SiC	Yük Değerleri			
	1 N	2N	3N	5N
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				

Şekil 4.12 : % 100 Al₁₂Si, % 5 SiCp, % 10 SiCp, %15 SiCp, %20 SiCp, % 25 SiCp ve % % 30 SiCp içerikli kompozit kaplamalar üzerine, 1, 2, 3, 5 N arası yüklerde sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 1000x büyütmedeki Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri.

Aşınma Ortamı	Yük Değerleri	
	1 N	5 N
Sulu		
Kuru		

Şekil 4.13 : % 25 SiC_p takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 1000x büyütmedeki Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri.

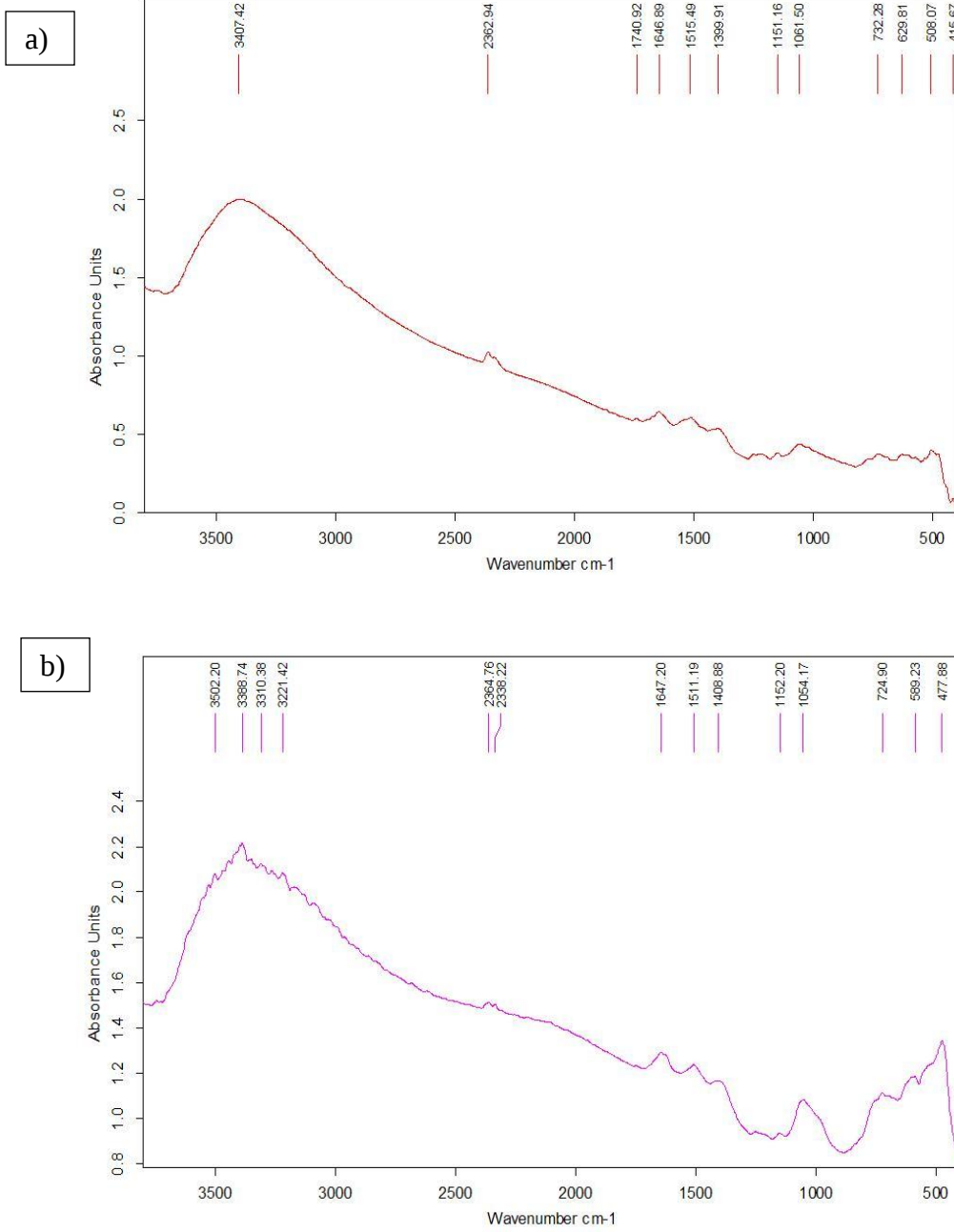
4.3 FTIR Analiz Sonuçları

%100 Al₁₂Si ve %30 SiC takviyeler ile kaplanmış numuneler saf su içerisinde 2 hafta boyunca tutulmuş, numunelerin sudaki tepkimeleri sonucu oluşan moleküler bağlarını gözlemlemek amacıyla FTIR analizi yapılmıştır. Bu numunelere yapılan FTIR analiz sonuçları şekil 4.14'te belirtilmiştir.

Şekil 4.14a, %100 Al₁₂Si ile kaplanmış numune üzerinden yapılmış FTIR sonucudur.

Şekil 4.14b'de ise SiC_p takviyeli kaplama üzerinden yapılan FTIR analizi verilmiştir.

Her iki analiz sonucu karşılaştırıldığında, Şekil 4.14'teki 3407.42 ve Şekil 4.15'teki 3388.74 cm⁻¹ piklerinin, Al-OH piki olduğu düşünülmektedir. SiC_p içeren numunelerin FTIR analizinde 3200-3500 cm⁻¹ arasında görülen ve % 100 Al₁₂Si FTIR analizinden farklı piklerin Si-OH bağları olduğu, 1054.17 cm⁻¹ pikini Si-O bağlarının oluşturduğu verilen referanslara göre tespit edilmiştir [23, 24].

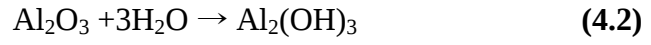
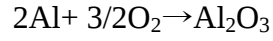
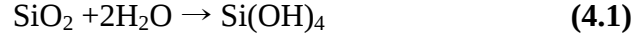
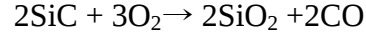


Şekil 4.14 : a) %100 Al₁₂Si ile kaplanmış numunenin b) % 30 SiC_p kaplı FTIR analizi.

Bulunan değerler SiC_p içerikli kaplamaların temas yüzeylerinin hidroksillendiğini göstermektedir. Aşınma test sonuçları da bunu destekler niteliktedir. Suda yapılan aşınma testlerinde bulunan sürtünme katsayı değerlerinin ve aşınma alanlarının SiC_p oranının artmasına bağlı olarak azalması, SiC_p'ün oluşturduğu Si(OH)₄ ve SiO₂ film tabakaları ile kontrol altına alınmaktadır [20]. Kompozit kaplamalar ve Al₂O₃ aşındırıcı top arasındaki temas yüzeylerinde oluşan Si(OH)₄ ve SiO₂ su içerisinde,

(4.1) numaralı tepkime sonucu meydana gelmiş ve yağlayıcı etkinin oluşmasını sağlamıştır.

(4.2) numaralı tepkimeyle oluşan hidroksillerden Al-OH, her iki FTIR sonucunda da görülmüş , sürtünme katsayısına herhangi olumlu bir etkisi saptanmamıştır. Su içerisinde geliştiği düşünülen reaksiyonlar aşağıda belirtilmiştir [20].



5. SONUÇLAR

Hacimce %100 Al₁₂Si, % 5 SiC_p- %95 Al₁₂Si, %10 SiC_p - %90 Al₁₂Si, %15 SiC_p - %85 Al₁₂Si, %20 SiC_p - %80 Al₁₂Si, % 25 SiC_p -%75 Al₁₂Si ve %30 SiC_p - %70 Al₁₂Si kompozisyonundaki yedi farklı kaplama soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile Al 1050 altlık malzeme üzerinde başarılı bir şekilde üretilmiştir. Çalışma kapsamında, optik ve taramalı elektron mikroskobu ile mikroskobik incelemeler, X ışınları difraksiyon analizi, sertlik ölçümleri ile karakterizasyon yapılmış sulu ve kuru ortamda aşınma testleri gerçekleştirilmiş, FTIR ile aşınma testleri karakterize edilmiştir.

Yukarıda belirtilen kaplamalar Al 1050 altlık malzeme üzerinde iyi bir yapışma göstermiş, ara yüzeyde herhangi bir boşluk veya süreksizlik gözlemlenmemiştir.

- XRD analizi sonucunda, Al, Si ve SiC_p ana fazları dışında herhangi bir pike rastlanmamıştır. Bu sonuçtan, SGDP tekniği ile üretilmiş kaplamalarda herhangi bir difüzyon, faz dönüşümü, yeni ürün oluşumu, kimyasal reaksiyon, oksitlenme vb. olayların meydana gelmediği, kaplamanın başarılı bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmıştır.
- Kaplamaların sertlik ölçümleri içerdikleri hacimce % SiC_p oranına göre değerlendirilmiştir. Al₁₂Si matris içerisine SiC seramiklerinin eklenmesi kaplamadaki sertliğin artmasına sebep olmuştur. Kaplamadaki % SiC_p takviye oranı arttıkça, sertlikte de artış meydana gelmiştir. % 100 Al₁₂Si içerikli kaplamaların sertliği 108 HV olarak, % 30 SiC_p takviyeli kompozitlerin sertliği 247 HV olarak bulunmuştur.
- Kaplamalardaki SiC_p yüzdesi arttıkça, sulu ortamdaki ve “kararlı haldeki” sürtünme katsayı değerleri azalmıştır. 1, 2 ve 3 N’luk yükler varlığında yapılan aşınma testlerinde % 5 SiC_p içeriğinden itibaren yağlayıcı etki görülmeye başlanmıştır. Bu yükler varlığında % 5 SiC_p oranı bile yeterli görülmektedir. 5 N yük varlığında yapılan test sonuçları % 15 SiC_p takviyeli

kaplamalardan itibaren sürtünme katsayısında belirgin bir düşüş görülmüş, yağlayıcı etki oluşmuştur.

- Kuru ortamdaki aşınma testleri sonucunda bulunan sürtünme katsayı değerleri, SiC_p takviyesine rağmen sulu ortamdaki sürtünme katsayı değerlerine göre daha yüksek kalmıştır. Kuru ortamda herhangi yağlayıcı bir etki oluşmamıştır.
- Sulu ortamdaki aşınma alanlarında, kuru ortam ile kıyaslandığında büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Aşınma alanlarında 1 N luk yük altında yapılan testlerde kuru ortama göre % 90 oranında bir azalma, 5 N yük altında yapılan testlerde % 29 oranında azalma meydana gelmiştir.
- 1, 2 ve 3 N yükler varlığında suda yapılan aşınma testlerinde aşınma hızları kuru ortama göre çok daha yavaş gerçekleşmiştir ancak 5 N'da sulu ve kuru ortamda yapılan testlerde aşınma hızları birbirine yaklaşmıştır. Suyun 1, 2, 3 N altında daha etkili yağlayıcılık gösterdiği anlaşılmıştır.
- Sulu ortamdaki aşınma alanları artan SiC_p yüzdesine bağlı olarak azalmıştır. Testlerde uygulanan yük arttıkça aşınma derinliği ve genişliğinin artmasına bağlı olarak aşınma alanlarında artış gözlemlenmiştir.
- Kaplamalardaki SiC_p oranının artışı ile beraber Al_2O_3 bilyaya yapışan aşınma ürünü azalmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan yük arttıkça Al_2O_3 bilyaya yapışan malzeme miktarının arttığı gözlemlenmiştir.
- FTIR analizleri değerlendirildiğinde suda gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda, O-H ile Si-O bağlarının oluştuğu düşünülmektedir. Yağlayıcı etkinin SiC_p 'ün aşınma testi sırasında saf su içerisinde meydana getirdiği tepkime sonrasında, aşınma yüzeylerinde biriken $\text{Si}(\text{OH})_4$ ile SiO_2 içeren ince filmler sonucu oluştuğu gözlemlenmiştir.
- SiC_p seramiklerinin sulu ortamda oluşturduğu yağlayıcı etki sayesinde, kuru ortamdaki aşınma testleri ile karşılaştırıldığında kaplamaların sürtünme katsayısı, aşınma alan ve hızlarında azalma meydana gelmiş; buna bağlı olarak aşınma dirençleri artmıştır. Deney sonuçları, tribolojik ortamlarda takviye malzemesi olarak SiC_p kullanılması ve aşınma ortamının sulu olarak tercih edilmesinin aşınma direncine olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

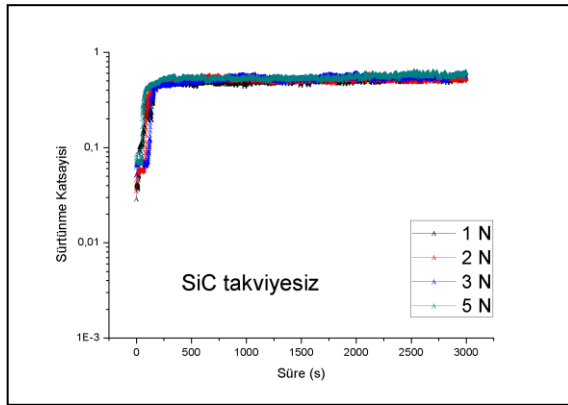
KAYNAKLAR

- [1] Papyrin A., (2007). *Cold Spray Technology*, x-xi.
- [2] Bartenev S., S., Fedko Y., P. ve Grigirov A., I., (1982). “Detonation Coatings in Machine Building”, Leningrad: Mashinostroenie (in Russian).
- [3] Url-1 <<http://supersonicspray.com/en/applications>>, alındığı tarih 12.03.2015
- [4] Champagne V., (2007). *The cold Spray Materials Deposition Process, , Fundamentals and Applications*
- [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] Url-2 < <http://en.dymet.net/> >, alındığı tarih: 17.04.2015
- [7] Altuncu, E., Üstel, F., (2010). Soğuk sprej Teknolojisi ve Uygulama alanları, *Metalurji*, **157**, 29-40.
- [8] 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.
- [9] KREYE H., GARTNER F., RİCHTER H.J., (2003). High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying: State of the Art, New Developments and Alternatives, Proc. 6. Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, P. Heinrich, Ed., Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., Unterschleisheim, Germany, 5-17.
- [10] GARTNER F., Stoltenhoff T., SCHIMIDT T., KREYE H., (2006). The Coldspray process and its potential for industrial applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, **15(2)**, 223-232.
- [11] GHELICHİ R., GUAGLIANO M., (2008). Coating by the cold spray process: a state of the art, , *Frattura ed Integrità Strutturale*, **8**, 30-44.
- [12] Birtch W., Kinetic spray for corrosion protection and metal part restoration, Nat. Center for Manufacturing Sciences, 1-20.
- [13] SCHMİDT T., ASSADİ H, GARTNER F., RİCHTER H., STOLTENHOFF T., KREYE H., KLASSEN T., (2009). From Particle acceleration to impact and bonding in cold spraying , *Journal of Thermal Spray Technology*, **18(5-6)**, 794-808
- [14] Sönmez, C., 2009. Al-12Si ve Al-12Si+Al Matrisli B4C Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Soğuk gaz dinamik Püskürtme Tekniği ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , İstanbul
- [15] <URL-3> <http://www.ippcm.com/Haber/Termal-Sprey-Kaplama-Teknoloji-Son-Trend-Soguk-Sprey.html>, alındığı tarih: 26.04.2015

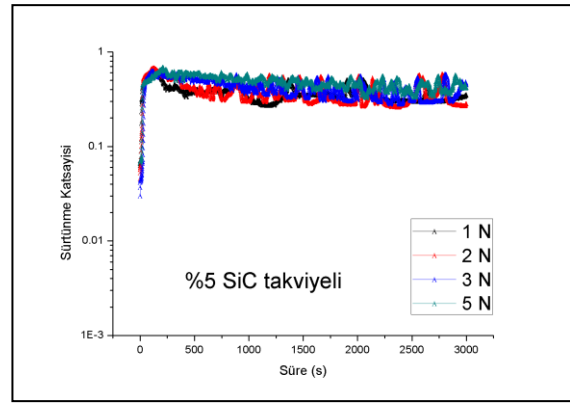
- [16] **M. Yandouzi , P. Richer, B. Jodoin**, (2009). SiC particulate reinforced Al–12Si alloy composite coatings produced by the pulsed gas dynamic spray process: Microstructure and properties
- [17] **Lidong Z., Bobzin K., He D., Zwick J., Ernst F., Lugscheider E.**, (2005). Deposition of Aluminium Alloy Al12Si by Cold Spraying
- [18] **Meydanoglu O., Jodoin B., ve Kayali E. S. ,** (2013). Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process, Istanbul Technical University, Istanbul
- [19] **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.
- [20] **Mindivan, H, Kayalı E. S., Çimenoglu H.**, (2007). Tribological behavior of squeeze cast aluminum matrix composites
- [21] <URL-4><https://www.ceramicindustry.com>
alındığı tarih: 27.04.2015
- [22] **Pressera, V., Nickel, K.G., Krummhauerb, O., Kailerb**, (2009). A model for wet silicon carbide tribo-corrosion, *Wear*, **267**, 168 – 176
- [23] **Martinez, N.**, (2009). Wettability Of Silicon, Silicon Dioxide, And Organosilicate Glass, Master Of Science, University Of North Texas,
- [24] **Aroke U.O, Abdulkarim A, Ogubunka R.O.**, (2013). Fourier Transform Infrared Characterization of Kaolin, Granite, Bentonite, and Barite, Abubakar Tafawa Balewa University, Chemical Engineering Programme

EKLER

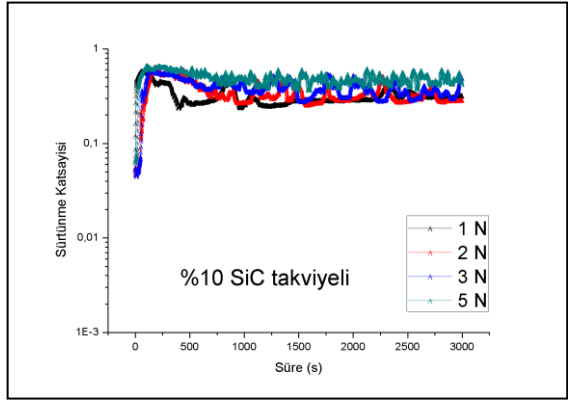
EK A: Grafikler



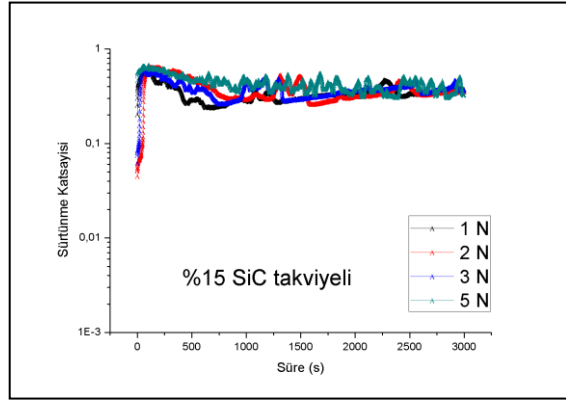
(a)



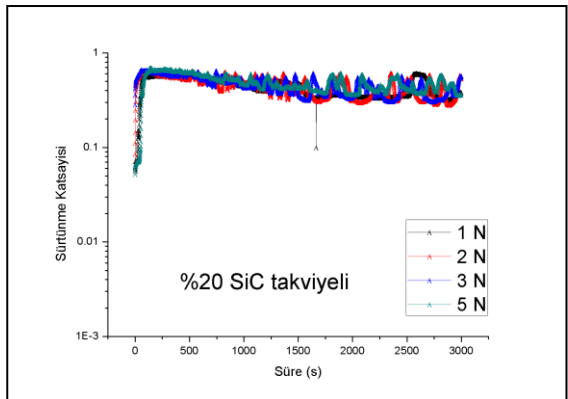
(b)



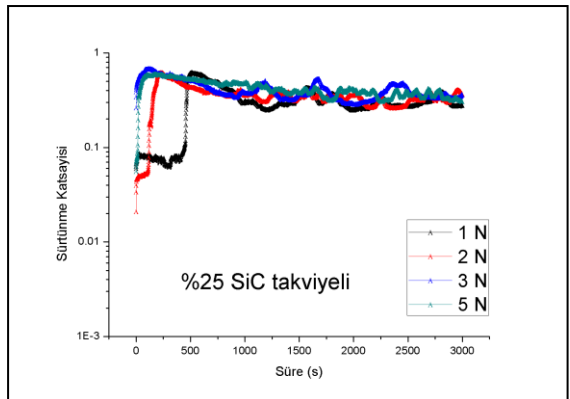
(c)



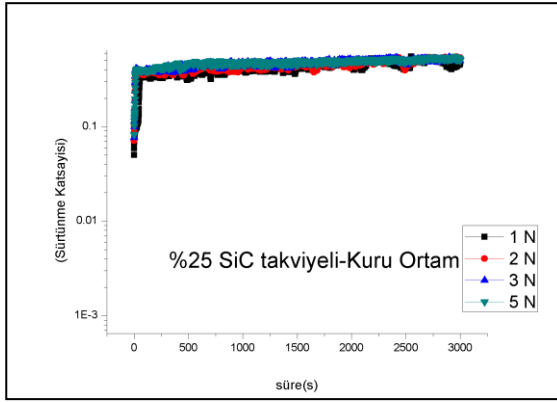
(d)



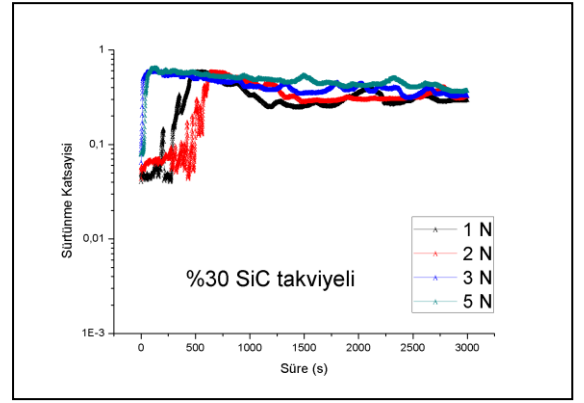
(e)



(f)

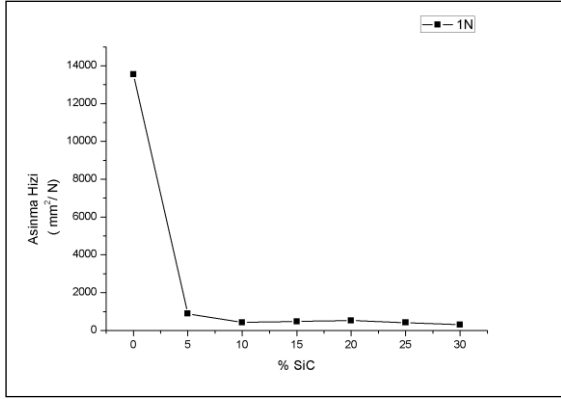


(g)

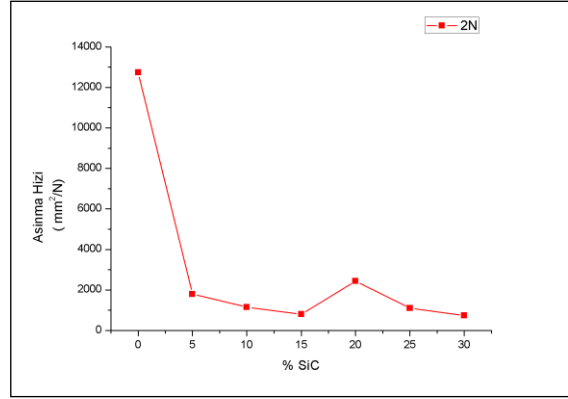


(h)

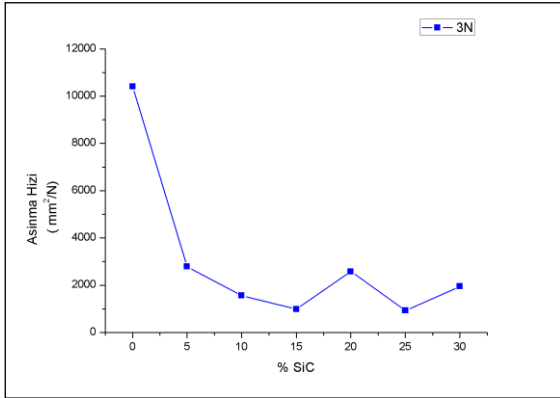
Şekil A.1 : (a) Takviyesiz (b) %5 SiC takviyeli (c) % 10 SiC takviyeli d) % 15 SiC takviyeli e) % 20 SiC takviyeli f) %25 SiC takviyeli g) % 25 SiC takviyeli-kuru ortam h) % 30 SiC takviyeli kaplamaların sürtünme katsayısı-süre grafikleri



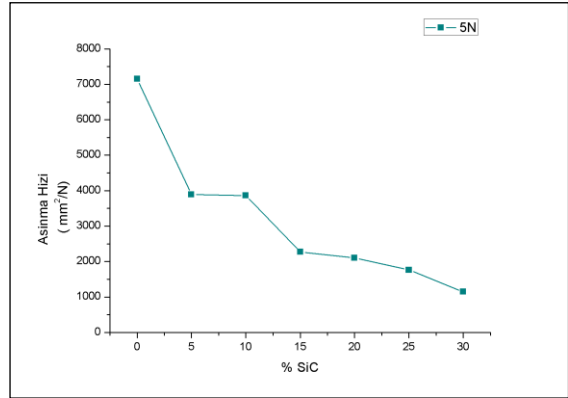
(a)



(b)

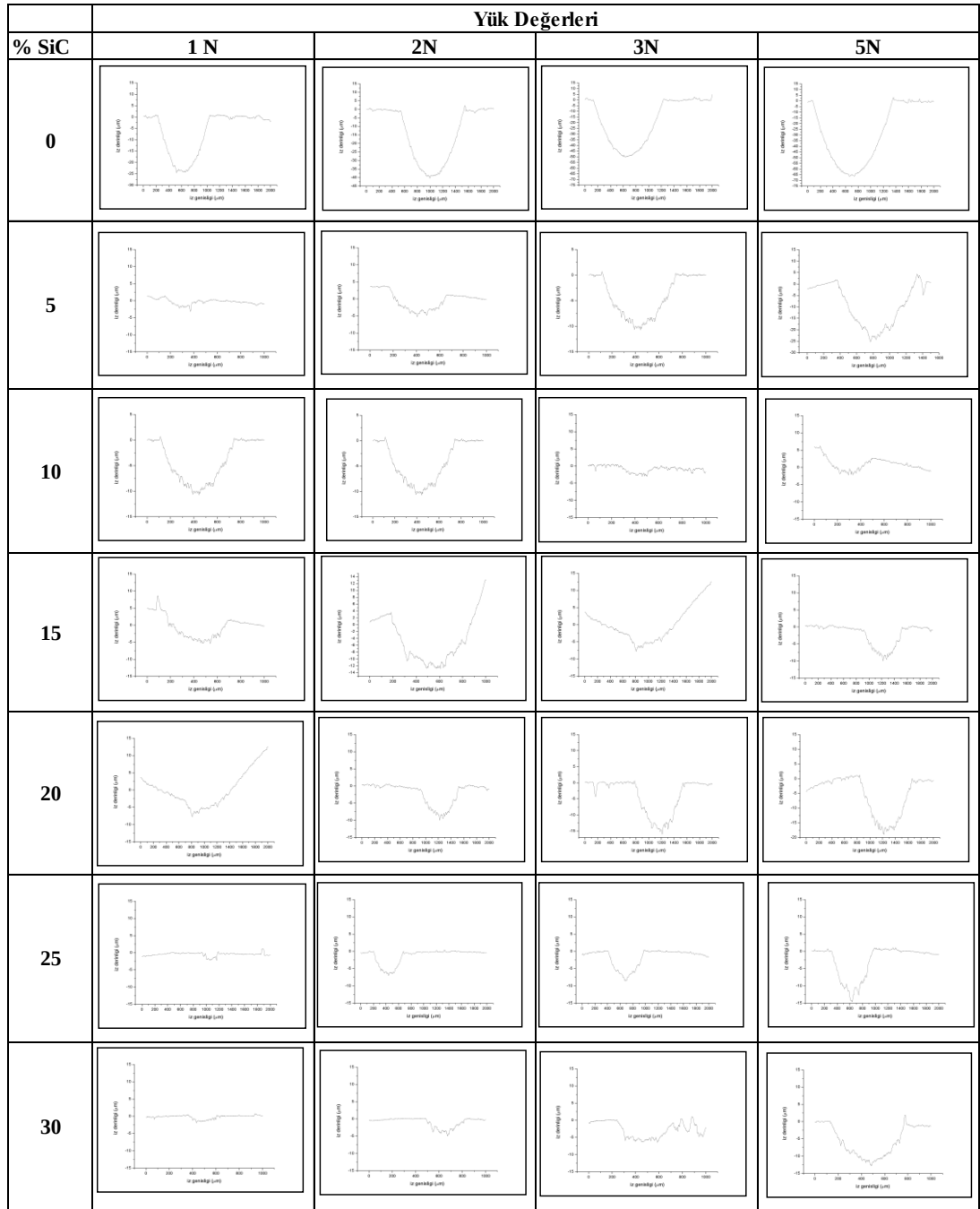


(c)



(d)

Şekil A.2 : Sulu ortamda (a) 1 N (b) 2 N (c) 3 N d) 5 N altında yapılan aşınma testleri sonucu bulunan aşınma hızları



Şekil A.3 : Sulu ortamdaki tüm aşınma testleri sonucu bulunan aşınma profilleri

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Özde Deprem

Doğum Yeri ve Tarihi: Fatih / 19.08.1990

E-Posta: depreozde@hotmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği