



Investigation of the Wear and Machinability Properties of Laser Coated AA7075 Aluminum Alloy Materials

Tuncay ŞİMŞEK^{1,*} Adnan AKKURT²

¹Mersini Üniversitesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, 33343, Yenişehir/MERSİN

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Received: 18/01/2019

Revision 04/03/2019

Accepted: 29/03/2019

Highlights

- Laser coating of ZrB₂ nanoparticles on AA7075 aluminum alloys substrate
- Detailed structural, morphological investigations of coated layers
- Wear resistance of coated layers

Keywords

Laser coating
Zirconium diboride
Abrasive water-jet
Wire-electrical discharge machining
Machinability

In this study, ZrB₂ nanoparticles were coated on the surface of AA7075 aluminum alloy with CO₂ laser. Then, coated layers were cut with abrasive water jet, wire-electrical discharge machining, laser and abrasive disc to determine the machinability properties of the layers. Phase structures and morphological properties of the coating layer were investigated by X-Ray diffractometer, scanning electron microscopy, and optical microscope. The wear resistance and hardness of the coating layers were determined by ball-on-disc wear device and microhardness device.

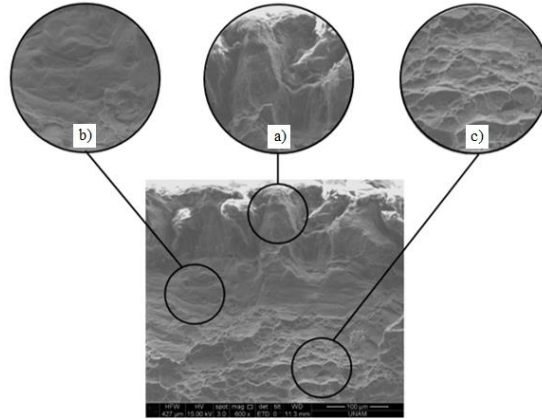


Figure A. SEM image of coated layers

Purpose: In this study, ZrB₂ nanoparticles which is synthesized by the mechanochemical method were coated on the surface of AA7075 aluminum alloy with CO₂ laser and characterized. After that the machinability properties of the coated layers were investigated by cut the layers with abrasive water jet, wire-electrical discharge machining, laser and abrasive disc, respectively.

Theory and Methods: In present study, two-step coating method was used for laser coating. At first stage, Zirconium diboride nanoparticles were mixed with resin and pre-placed on AA7075 aluminum substrate. At second stage, laser scanning speed and laser powers were changed and substrate surfaces were scanned. After coating processes, the machinability properties of laser coated layers were investigated by cut the layers with abrasive water jet, wire-electrical discharge machining, laser and abrasive disc, respectively. For characterization optic microscopy, X-Ray diffractometer, scanning electron microscopy, ball-on-disc wear device and microhardness devices were used.

Results: Despite the usage of different laser powers and scanning speeds applied, all coating layers composed of fractures and pores due to the high differences in melting temperatures of the ZrB₂ and aluminum alloy substrate. It was seen that hardness of substrate was increased from 110 HV to 190 HV after coating processes. It has been determined that the most suitable cutting method is the abrasive disc cutting method for laser coated samples.

Conclusion: In this study, ZrB₂ nanoparticles were coated by CO₂ laser on the surface of AA7075 aluminum alloy. The coating thickness were found as 87 µm, after processing with 70 W laser power and 1000 mm/min laser scanning speed. It was seen that wear resistance of laser coated layers were increased significantly and hardness of substrate was increased from 110 HV to 190 HV after laser coating processes.



Lazer ile Kaplanan AA7075 Alüminyum Alaşımı Malzemelerin Aşınma ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması

Tuncay ŞİMŞEK^{1,*} Adnan AKKURT²

¹Mersini Üniversitesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, 06374, Çiftlikköy/MERSİN

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada, mekanokimyasal yöntemle sentezlenmiş ZrB₂ nanoparçacıkları CO₂ lazeri ile AA7075 alüminyum alaşımı yüzeyine kaplanmıştır. Lazer gücünün ve lazer tarama hızının kaplama tabakaları üzerindeki etkilerini belirlemek için iki farklı deney seti gerçekleştirilmiştir. İlk deney setinde 1000 mm/dak tarama hızı sabit tutularak 50, 70 ve 100 W lazer güçlerinde, diğer deney setinde ise 70 W lazer gücü sabit tutularak 300, 500 mm/dak tarama hızlarında kaplama deneyleri yapılmıştır. Kaplama tabakasının faz yapıları ve morfolojik özellikleri X-ışınları kırınım difraktometresi, taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile incelenmiştir. Kaplama tabakalarının aşınma dayanımları ve sertlikleri ball-on-disk aşınma cihazı ve mikrosertlik cihazı ile belirlenmiştir. Daha sonra kaplanmış numunelerin işlenebilirlik özelliklerini tespit etmek için, numuneler sırasıyla aşındırıcı su jeti, tel erozyon, lazer ve aşındırıcı disk ile kesilerek karakterize edilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında ana metalin sertliğinin 110 HV'den 190 HV'ye çıktığı tespit edilmiştir. Diğer yöntemlere kıyasla ısı girdisinin minimum olmasından dolayı aşındırıcı su jeti ön plana çıkmasına rağmen, en az tahribat aşındırıcı disk ile kesmede gözlenmiştir. Lazer yöntemiyle kaplanan numuneler için en uygun kesme yönteminin aşındırıcı disk ile kesme yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of the Wear and Machinability Properties of Laser Coated AA7075 Aluminum Alloy Materials

Abstract

In this study, ZrB₂ nanoparticles which is synthesized by the mechanochemical method were coated on the surface of AA7075 aluminum alloy with CO₂ laser. Two different experimental sets were performed to determine the effect of laser power and laser scanning speed on coating layers. At the first experimental set, the scanning speed of 1000 mm / min was kept constant, and experiments were performed at 50, 70 and 100W laser powers, in the other experiment set, 70W laser power was kept constant and experiments were performed at 300, 500 mm / min scanning speed. Phase structures and morphological properties of the coating layer were investigated by X-Ray diffractometer, scanning electron microscopy, and optical microscope. The wear resistance and hardness of the coating layers were determined by ball-on-disc wear device and microhardness device. To determine the machinability properties, the coated samples are then cut with abrasive water jet, wire erosion, laser and abrasive disc, respectively, and characterized. It was determined that the hardness of substrate increased from 110 HV to 190 HV after coating processes. In spite of the minimal heat input compared to other methods, although the abrasive water jet was prominent, the least damage was observed in the cutting with abrasive disc. It has been determined that the most suitable cutting method is the abrasive disc cutting method for laser coated samples.

Makale Bilgisi

Başvuru: 18/01/2019

Düzeltilme: 04/03/2019

Kabul: : 29/03/2019

Anahtar Kelimeler

Lazer kaplama
Zirkonyum diborür
Aşındırıcı su jeti
Tel-erozyon
İşlenebilirlik

Keywords

Laser coating
Zirconium diboride
Abrasive water-jet
Wire-electrical discharge
machining
Machinability

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum alaşımı malzemeler, magnezyum ve titanyum gibi metallerle birlikte hafif metaller grubuna girmekte ve imalat teknolojilerinde en çok kullanılan metallerden biri olarak öne çıkmaktadır. Alüminyumun hafif olması, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, korozyon direnci ve diğer metaller ile yüksek çekme mukavemetine sahip alaşımlar oluşturabilmesi önemli özelliklerindedir. Ayrıca imalatının kolay

olması, haddelenebilir, preslenebilir ve bükülebilir olması gibi özellikleri birçok alanda kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak bu üstün özelliklerinin yanı sıra çok düşük aşınma direncine sahip olması özellikle imalat sektöründe kullanımını kısıtlamaktadır [1-6]. Bu nedenle CVD, plazma ark, lazer vb. birçok kaplama metodu ile alüminyum alaşımı malzemeler kaplanarak yüzey özellikleri geliştirilmektedir [7-11]. Bu yöntemler arasında, lazerle kaplama ile ilgili çalışmaların son yıllarda arttığı görülmektedir [12-14]. Lazer gücü, tarama hızı, kullanılan koruyucu gazların basıncı, yana kayma mesafesi vb. gibi parametreler değiştirilerek malzeme yüzeylerinde kaplama tabakaları elde edilmektedir [15]. Majumdar ve ark. [16], Ti-6Al-4V alaşımının yüzeyini Ar gazı atmosferinde, diyot lazerle Ti - % 2 B içeren tozlarla kaplayarak, TiB dağılımlı α -Ti matrisli kompozit tabakası elde etmeye çalışmışlardır. Kaplama tabakasının ortalama mikrosertliğinin seçilen lazer parametrelerine bağlı olarak 290-500 VHN olduğunu ve kaplama tabakasının TiB ve α -Ti matrisi içerisinde ince küresel ve iğnemi şeklinde TiB çökeltilerinden oluştuğunu rapor etmişlerdir. Bir başka çalışmada Tomida ve ark. [17], A5052 alaşımı malzeme yüzeyini, CO₂ lazeri ile Al-Fe tozlarıyla kaplayarak, alüminyum alaşımı yüzeyinin sertliğini ve aşınma dayanımlarını geliştirmişlerdir. 100 mm/dak lazer tarama hızında Ar atmosferinde ön kapladıkları numunelerin sertliğinin 800-1000 HV'ye çıktığını belirtmişlerdir. Man ve ark. [18], NiCrSiB tozlarını Al6061 alüminyum alaşımı yüzeyine Nd-YAG lazer ile kaplamış ve sertliğin yaklaşık 900 HV'ye çıktığını göstermişlerdir. Xu ve ark. [19], Ti-Al-Fe-B tozları ile AA2024 malzeme yüzeyini CO₂ lazeri ile kaplamış ve aşınma dayanımının yaklaşık 15 kat iyileştirildiğini rapor etmişlerdir. Liang ve ark. [20] ise, Al-Si alaşımı yüzeyini NiCrAl tozları ile kapladıklarında aşınma dayanımının 3.6 kat arttığını belirtmiştir.

Bilindiği gibi malzeme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte parçaları şekillendirme, kesme vb. işleme yöntemleri de sürekli olarak gelişmektedir. Doğru seçilmeyen yöntemler nedeniyle malzemeler özelliklerini yitirmekte ve kritik süreçlerde fonksiyonlarını yerine getirememektedir. Bu nedenle malzemeler için en uygun kesme yönteminin belirlenmesi oldukça önemlidir. Literatür incelendiğinde özellikle kaplanmış numunelerin işlenebilirliği ile ilgili çalışmalara rastlanmamıştır. Yapılan çalışmada, ilk defa mekanokimyasal yöntemle üretilen yüksek ergime sıcaklığına (~3027 °C) sahip ZrB₂ nanokristalleri AA7075 alaşımı malzeme yüzeyine ön kaplanarak 2 kW'lık CO₂ lazeri ile kaplanmıştır. Lazer gücünün ve tarama hızının kaplama tabakaları üzerindeki etkilerini belirlemek için iki farklı deney seti gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 1000 mm/dak tarama hızı sabit tutularak 50, 70 ve 100 W lazer güçlerinde deneyler yürütülmüştür. Ardından 70 W lazer gücü sabit tutularak 300, 500 mm/dak tarama hızlarında kaplama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaplanan numunelerin, kaplama tabakalarının yüzeylerinin ve kesitlerinin faz yapıları ve mikroyapı/morfolojileri X-Işınları kırınımı difraktometresi ve taramalı elektron mikroskobu ile analiz edilmiştir. Ball-on-disk aşınma cihazı ve mikrosertlik cihazı ile aşınma karakteristikleri belirlenmiştir. Ardından kaplama tabakaları sırasıyla, aşındırıcılı su jeti, tel erozyonu, aşındırıcılı disk ve lazer ile kesilmiş ve numuneler hiçbir işleme maruz bırakılmadan karakterize edilmiş ve en uygun kesme yöntemi ortaya konmuştur.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1 Malzeme ve kaplama işlemi (Materials and coating process)

Deneylerde kaplama malzemesi olarak mekanokimyasal yöntemle sentezlenen ZrB₂ nanoparçacıkları kullanılmıştır. ZrB₂ nanoparçacıkları ZrO₂, B₂O₃ ve Mg tozları ile 40:1 bilye-toz kütle oranında ve 350rpm dönme hızında gezegensel tip öğütücü ile sentezlenmiştir. Sentez sonrası MgO ve ZrB₂ fazından meydana gelen toz karışımı 0.1 M asetik asit çözeltisinde 400 rpm dönme hızında saflaştırıldıktan sonra 30 mbar vakumda 70 °C'de 10 saat süre ile kurutulmuştur. Liç işlemi sonrası XRD analizlerinden saf bir şekilde elde edildiği tespit edilen ve parçacık boyutu yaklaşık olarak 10 nm olan ZrB₂ nanokristalleri kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır [21]. Kaplama deneylerinde alt metal olarak, kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen, 100x15x4mm boyutlarında hazırlanan AA7075 alüminyum alaşımı malzeme kullanılmıştır.

Tablo 1. AA7075 alüminyum alaşımı malzemenin kimyasal bileşimi

Element	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
Ağırlıkça (%)	0.5	0.5	1.2-2.0	0.3	2.1-2.9	5.1-6.1	0.18-0.28	0.25	Kal.

Lazer kaplama deneyleri 2 kW'lık CO₂ lazeri (Amada, LC-2415 α III, Japan) ile iki aşamalı kaplama metodu uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu metotta yüzeyin lazerle kaplanması sırasında, ergime havuzunu oksitlenmeden koruyan gazların basınçları nedeniyle ön kaplanmış tabakaların yüzeyden uzaklaşması sık karşılaşılan problemlerdendir. Kullanılan reçinenin metal yüzeyine iyi yapışmasını sağlamak amacıyla ön kaplama işleminden önce ana metal yüzeyleri kumlama işlemine tabii tutulmuş sonrasında kir ve paslardan arındırılmak için aseton-etanol ile yıkanmıştır. Yüzey temizliğinin ardından kaplanacak ZrB₂ nano parçacıklar fenolik reçine (Araldit 71) içerisine karıştırılarak metal yüzeylerine 50 µm kalınlığında ön kaplanmıştır. Ön kaplama sonrası kaplamanın yüzeye daha iyi bağ yapması ve fenolik reçinenin malzeme yüzeyinde ince karbon tabakası oluşturması için numuneler vakum etüvde 20mbar vakumda 200°C de 4 saat süreyle kurutulmuştur. Literatürde fenolik reçinenin yaklaşık 200°C kurutulması sonucu, metal yüzeylerinde karbon film tabakasının oluştuğu ve lazerle işleme sonrası elde edilen bu karbür fazlarının malzeme sertliğini ciddi şekilde arttırdığına dair çalışmalar göze çarpmaktadır [22-24]. İkinci aşamada ise, kurutulan numunelere 600 kPa basınçta, N₂ atmosferi altında, 0.1mm yana kayma mesafesi ile lazer kaplama yapılmıştır. Kaplama deneylerinde CO₂ lazeri ve 1.5mm çapında nozul kullanılmıştır. Ön kaplanmış numuneler, Tablo 2'de verilen parametrelerde farklı lazer güçleri ve ilerleme hızlarında kaplanmıştır. Kaplamalar 1000 mm/dak ilerleme hızı sabit tutularak 50, 70 ve 100 W lazer güçlerinde, daha sonra 70W lazer gücü sabit tutularak 300, 500 mm/dak ilerleme hızları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. İşlenebilirlik deneylerinde 70W lazer gücünde ve 1000 mm/dak'da kaplanan numuneler kullanılmıştır.

Tablo 2. Lazerle kaplama parametreleri (Laser coating parameters)

Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/dak)	Frekans (Hz)	Nozul çapı (mm)	Nozul boşluğu (mm)	Gaz basıncı (kPa)
50	1000	1000	1.5		
70	300/500/1000			1.5	600
100	1000				

2.2 Kaplama tabakalarının karakterizasyonu ve aşınma deneyleri (The characterisation of coating layers and wear tests)

Kaplama tabakalarının faz yapıları X-ışınları kırınımı difraktometresi (Rigaku, D/Max-2200) ile 2-90° aralığında, 40 kV ve 30 mA'da Cu-Kα ışınlarıyla ($\lambda=1.54\text{\AA}$), dakika da 4° tarama hızı ile belirlenmiştir. Kesilen numunelerin mikroyapı incelemeleri, optik mikroskop (Leica M205 C) ve taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışınları analizi ile (SEM-EDX, FEI Quanta 200F) gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikrosertlikleri Shimadzu HMV-2 mikrosertlik cihazında 50 g yük ile 15 s süre ile ölçülmüştür. Kaplama tabakalarının aşınma testleri ball-on-disk aşınma test cihazında kuru ortamda yapılmıştır. Numuneler 1N yük altında 6 mm çapında WC bilye ile 100 m mesafede aşındırılmıştır. Kullanılan aşındırıcının malzeme yüzeyinde hareket ettiği toplam kurs boyu 8.5 mm'dir. Deneyler sonucunda, profilometre cihazıyla aşındırılmış yüzeylerin üç boyutlu yüzey haritaları çıkarılırken, deney süresince ortalama sürtünme katsayıları ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.

2.3 İşlenebilirlik deneyleri (Machinability experiments)

Kaplanan numunelerin işlenebilirlik özelliklerini araştırmak için, numuneler sırasıyla aşındırıcılı su jeti, tel erozyon, lazer ışını ve aşındırıcılı disk ile kesilmiştir. Aşındırıcılı su jeti ile kesme deneyleri KMT-SLV-E50 model cihazında, tel erozyon ile kesme deneyleri Makino-Dou 43 model cihazda, lazer ışını ile kesme deneyleri aynı zamanda kaplama deneylerinin de yapıldığı Amada-Lasmac LC-2415αIII cihazında, aşındırıcılı disk ile kesme deneyleri ise BMS-Bulucut-3 model kesme cihazında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan kesme parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kesme testlerinde uygulanan parametreler

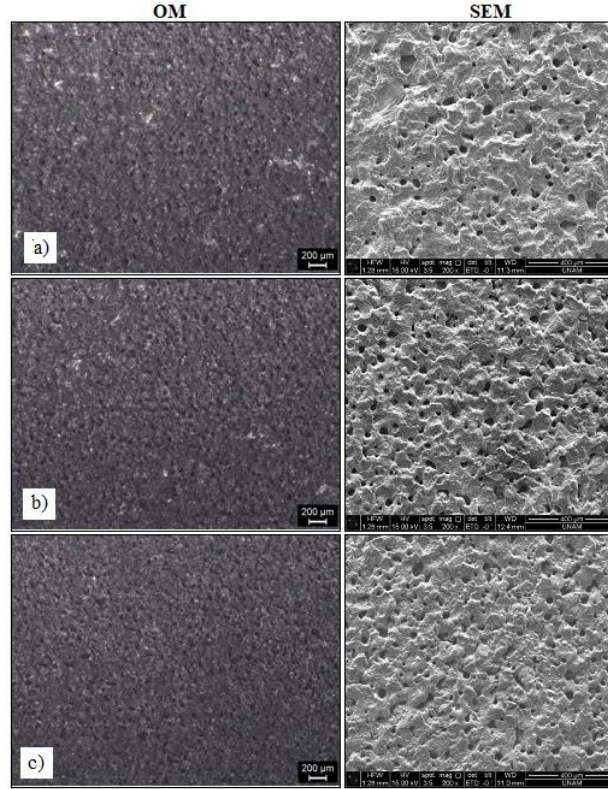
Aşındırıcılı Su Jeti Kesme Parametreleri	
Nozul Çapı (mm)	0.75
Kum Debisi (g/dak)	250
Basınç (bar)	4000
İlerleme Hızı (mm/dak)	150
Lazer Işını Kesme Parametreleri	
Lazer Gücü (W)	2000
Kesme Hızı (mm/dak)	1000
Frekans (Hz)	1000
Duty (%)	55
Ortalama Güç (W)	880
Tel Erozyon Kesme Parametreleri	
Tel Çapı (mm)	0.3
Tel Cinsi	CuZn
Tel Hızı (m/dak)	6
Kesme Hızı (mm/dak)	11
Gerginlik (cN)	10
Enerji Verilen Süre (ms)	18
Enerji Kesilen Süre (ms)	70
Aşındırıcılı Disk Kesme Parametreleri	
Kullanılan Disk	SiC
Disk Ölçüleri (dış çap x iç çap x kalınlık) (mm)	250x32x1.6
Devir (rpm)	2840
İlerleme Hızı (mm/s)	1
Kesme Sistemi	Otomatik
Soğutma	Bor yağı katkılı soğutma sıvısı

Kesilen numuneler sırasıyla aşındırıcı zımparalar ile aşındırılmış, 6 μm 'lik ve 3 μm 'lik pastalar ile parlatılmıştır. Daha sonra numuneler morfolojik olarak karakterize edildikten sonra % 5 lik hidroflorik asit çözeltisinde 75 s bekletilerek mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

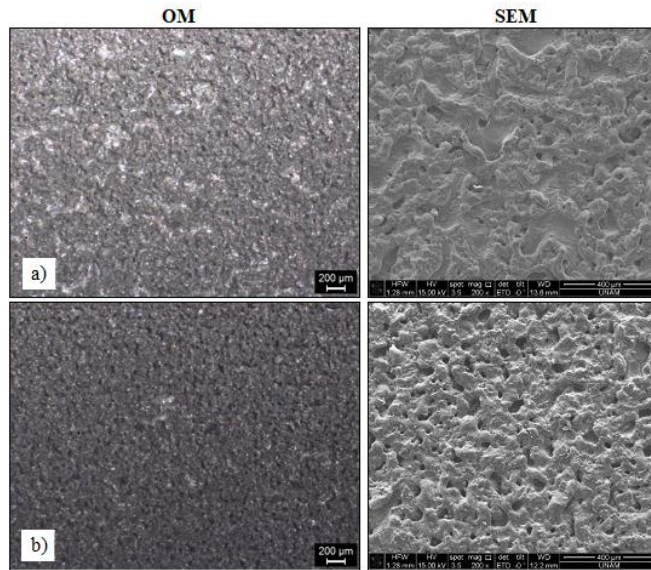
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Kaplama deneyleri (Coating Tests)

Şekil 1’de 1000 mm/dak sabit ilerleme hızında 50, 70 ve 100W lazer güçlerinde kaplanan numunelerin, Şekil 2’de ise 70 W sabit lazer gücünde ve 300 ve 500 mm/dak ilerleme hızlarında kaplanan numunelerin yüzeylerinin optik ve SEM görüntüleri verilmiştir.

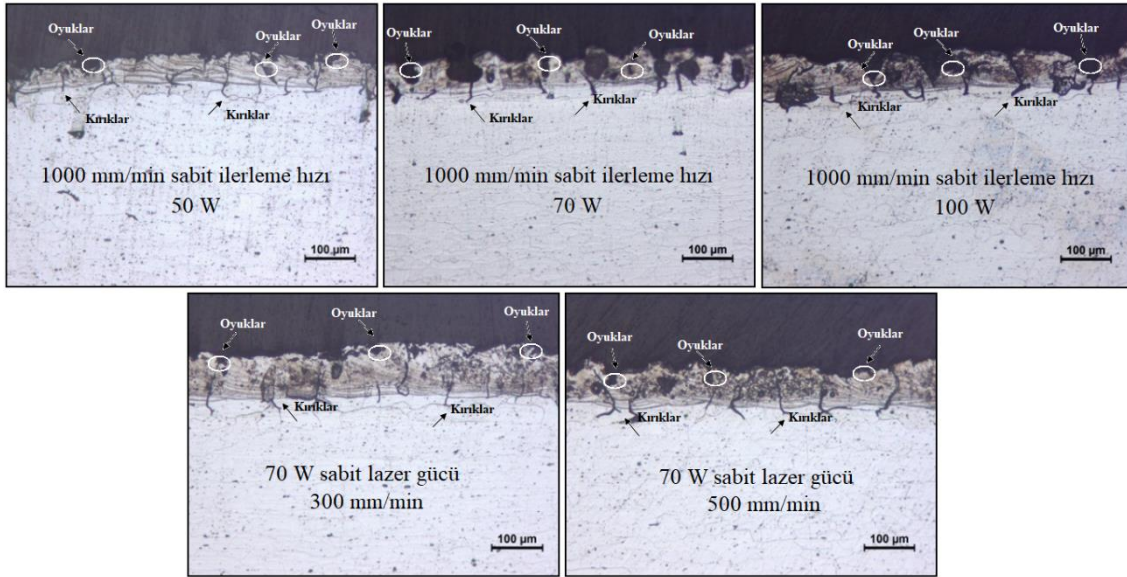


Şekil 1. İlerleme hızı (1000mm/dak) sabit tutularak farklı lazer güçlerinde elde edilen kaplamaların optik mikroskop (OM) (X50) ve SEM (X200) görüntüleri a) 50 W, b) 70 W, c) 100 W



Şekil 2. 70 W sabit lazer gücünde, farklı ilerleme hızlarında elde edilen kaplamaların optik mikroskop (OM) (X50) ve SEM (X200) görüntüleri a) 300 mm/dak, b) 500 mm/dak

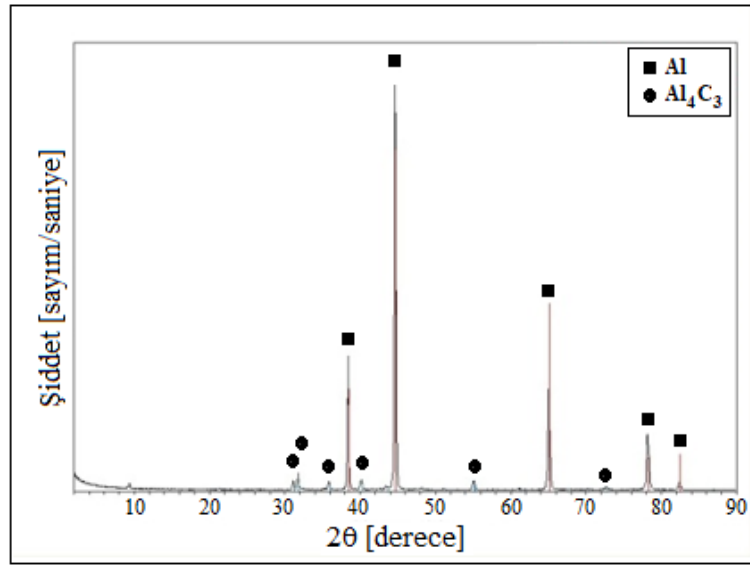
Kaplama deneylerinde kullanılan lazer gücü aralığı çok dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Alüminyum alaşımı malzeme yüzeyini kaplarken, 50-100 W aralığının dışındaki lazer güçlerinde çok şiddetli kırıklar ve oyuklar gözlemlendiği için, deney parametreleri olarak alt limit olarak 50 W, üst limit olarak ise 100 W lazer gücü seçilmiştir [21,25-27]. İlerleme hızı olarak ise 300-1000 mm/dak aralığının dışındaki tüm deneylerde pürüzlülük, gözeneklilik, kırık ve oyuk oluşumunda ciddi artışlar gözlemlenmiştir. Mikroskobik incelemelerde, uygulanan farklı parametrelere rağmen kaplama tabakaları arasında çok ciddi farklılıklar gözlemlenmiştir. Ancak, lazer gücünün ve tarama hızının artması ile kaplama tabakalarında oluşan gözenek, mikro-kırık ve oyukların bir miktar arttığı tespit edilmiştir. (Şekil 1 ve 2). AA7075 alaşımı ve kaplama malzemesi arasındaki yüksek ergime sıcaklığı-termal genişleme katsayısı farkı ve hızlı soğuma neticesinde yüzeylerde kırıklar ve çatlakların oluşumu gerçekleşmiştir. Literatür incelendiğinde, Iwatani ve arkadaşları da 5052 Alüminyum alaşımı malzemeyi Fe-Cr-C tozlarıyla CO₂ ve diyot lazeri ile kapladıklarında, kaplama tabakası ve ana metal arasındaki ısıl genişleme katsayısının farklılığından dolayı oluşan ısıl gerilmeler nedeniyle ara yüzeylerde ve kaplama tabakalarında çatlakların oluştuğunu, ana metal ve kaplama malzemelerindeki seyrelmenin azalmasıyla kırıkların boyunun azaldığını belirtmişlerdir [28]. Quyang ve arkadaşları tarafından yürütülen başka bir çalışmada ise üç farklı alüminyum alaşımı yüzeyini, ZrO₂ tozları ile tek aşamalı lazerle kaplama yöntemi (in-situ) ile kapladıklarında, hızlı soğuma esnasında meydana gelen ısıl gerilmelerden dolayı kaplama tabakasında kırıkların oluştuğunu rapor etmişlerdir [29]. Kaplanan numunelerin, metalografik numune hazırlama işlemlerinden sonraki kesit görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kaplama tabakalarının kesit görüntüsü (optik mikroskop, X100)

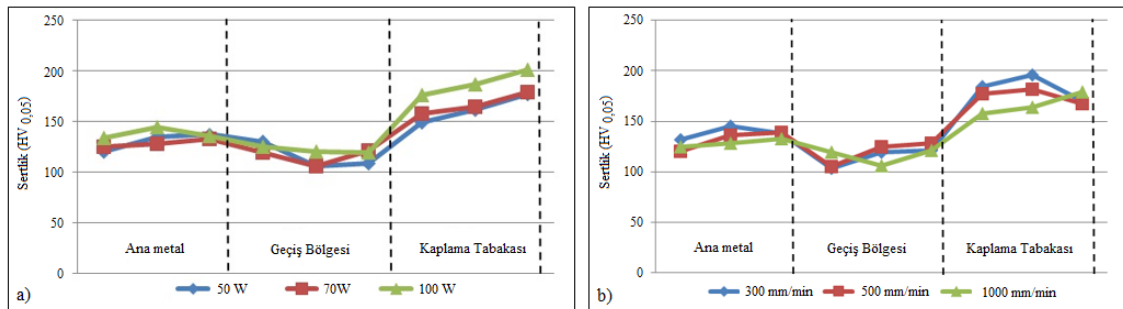
Şekil 3'te verilen kesit görüntüleri incelendiğinde, lazer gücünün artması ile kaplama kalınlığının arttığı, mikro-kırıkların makro kırıklara dönüştüğü görülmektedir. Yüzeylerde oluşan kaplamaların homojen ve düzgün dağılımlı bir yapıya sahip olmamasından dolayı minimum ve maksimum kalınlıklar dikkate alınarak yapılan incelemelerde, 1000 mm/dak sabit ilerleme hızında ~ 50, 70 ve 100 W lazer güçlerinde elde edilen kaplamaların kalınlıklarının sırasıyla yaklaşık olarak 70, 87 ve 91 µm arasında olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızının artırıldığı deneylerde ise kaplama kalınlığının bir miktar azaldığı, gözenek ve çatlakların ise büyüdüğü gözlemlenmiştir (Şekil 2). Beklendiği gibi düşük ilerleme hızında malzeme yüzeyinin daha fazla lazer ışınına maruz kalması kaplama kalınlığının artmasına neden olmuştur. Kaplama kalınlıkları, 300 ve 500 mm/dak ilerleme hızlarında elde edilen kaplamalar için ise yaklaşık olarak 106 ve ~93 µm olarak ölçülmüştür. Tespit edilen bu durum Fu ve arkadaşlarının, Ni-Cr tozlarını lazerle AA6061 alüminyum alaşımı yüzeyine kapladıkları çalışmada da gözlemlenmiştir. Farklı lazer güçleri ve farklı ilerleme hızlarında gerçekleştirdikleri deneylerin sonucunda, lazer gücünün artmasıyla kaplama tabakalarında kırıkların ve gözenek boyutunun arttığını rapor etmişlerdir [30]. Kaplama tabakalarının faz yapıları XRD analizi ile tespit edilmiştir. Uygulanan farklı parametrelere rağmen tüm numunelerde benzer fazlar gözlemlendiği için 70 W lazer gücünde ve 1000 mm/dak ilerleme hızlarında gerçekleştirilen kaplamaların XRD deseni verilmiştir. Şekil 4'teki XRD deseni incelendiğinde lazer güçlerinin değişmesine rağmen ZrB₂

fazına ait pikler gözlenmezken, ana metalden gelen Al fazı ve kullanılan fenolik reçineden dolayı yüzeyde oluşan düşük şiddetli Al_4C_3 fazı gözlenmiştir. ZrB_2 fazına ait piklerin gözlenmemesinin nedeninin, ergimiş ana metal ve ZrB_2 arasındaki yüksek ergime sıcaklığı (3027 °C) farklılığından dolayı difüzyonun gerçekleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca kaplama işlemi esnasında koruyucu gazın etkisiyle yüzeyden ZrB_2 tozlarının uzaklaşması veya ergimiş ana metale nispeten, ergimiş yüzeyde çok az miktarda ZrB_2 bulunması, bu faza ait piklerin XRD deseninde yansımamasının nedenleri arasında düşünülmektedir. Yılbaş ve arkadaşları alümina yüzeyini lazerle karbonitrürlerken, alümina yüzeyine sürdükleri fenolik reçineyi karbon kaynağı olarak kullandıklarını ve alümina yüzeyinde alüminyum karbür fazları elde ettiklerini belirtmişlerdir [31].



Şekil 4. Kaplama tabakasının XRD deseni

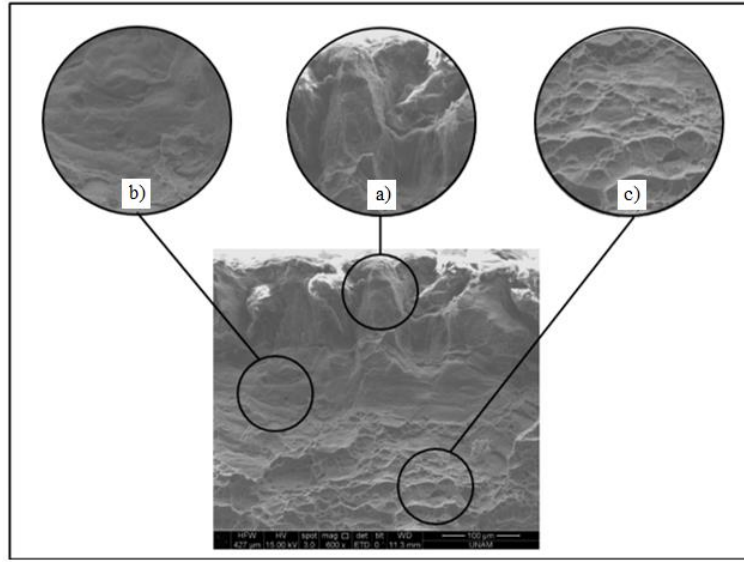
Kaplama yüzeyindeki faz yapıları belirlenen numunelerin mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde numunelerin kesitlerinde ana metal, geçiş bölgesi ve kaplama tabakasının her birinden beşer ölçüm alınarak ortalamaları dikkate alınmıştır. Şekil 5'te farklı lazer güçlerinde ve farklı ilerleme hızlarında elde edilen kaplamaların mikrosertlik grafikleri verilmiştir.



Şekil 5. a) farklı lazer güçlerinde b) farklı ilerleme hızlarında kaplanmış numunelerin mikrosertlik değerleri

Şekil 5'teki grafikler incelendiğinde farklı lazer güçlerinde ve ilerleme hızlarında yapılan kaplama deneylerinde, ana metale göre geçiş bölgesinin sertliğinde bir miktar azalma olduğu ve kaplama tabakasının sertliğinin ise arttığı belirlenmiştir. Değişen lazer parametrelerinde elde edilen numunelerin sertlik değerlerinin bölgesel olarak birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüş, ana metalin sertliği yaklaşık 140

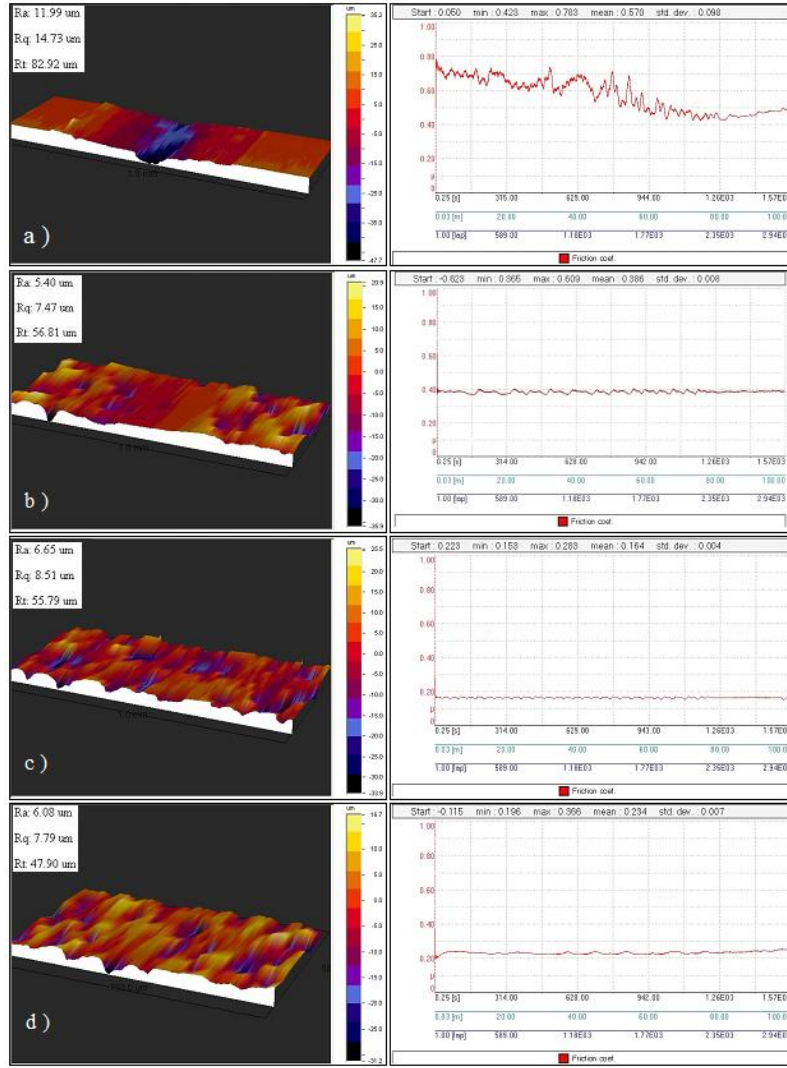
HV, geçiş bölgesinin sertliği yaklaşık 100-110 HV ve kaplama tabakalarında ise ölçülen en yüksek sertlik değerinin 190 HV olduğu tespit edilmiştir. Almeida ve arkadaşları da, Cr tozları ile 7175 alüminyum alaşımının yüzeyinde gözenekli kaplamalar elde ettiklerini, alüminyum alaşımı yüzeyinde oluşan AlCr fazlarının 155 HV olan ana metal sertliğini 300 HV'ye çıkardığını belirtmişlerdir [32]. Bir başka çalışmada, Sun ve arkadaşları ise AlSi12 malzemesini Al-12Si ve SiC tozlarıyla lazerle kapladıklarında ana metalin 90-110 HV olan sertlik değerinin yaklaşık olarak 220-280 HV'ye çıktığını rapor etmişlerdir [33]. Lazerle kaplanan alüminyum alaşımının, kaplama ve geçiş bölgesinin bölgesel yapılarını görmek için 70 W lazer gücünde kaplanmış numune sıvı azot içerisinde 10 dakika bekletilerek kırılmıştır. Şekil 6'da sıvı azot içerisinde kırılmış numunenin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde kaplama tabakası (a), ısıdan etkilenen bölge (b) ve ana metalin (c) birbirinden farklı yapıda olduğu görülmüştür. Kaplama esnasında meydana gelen hızlı soğuma neticesinde, katılaştıran kaplama tabakasında sütünsal yapılar gözlenirken, geçiş bölgesinde bu sütünlü yapının kaybolduğu ve kaplama tabakasından ana metale doğru sünek kırılmaların meydana geldiği gözlenmiştir.



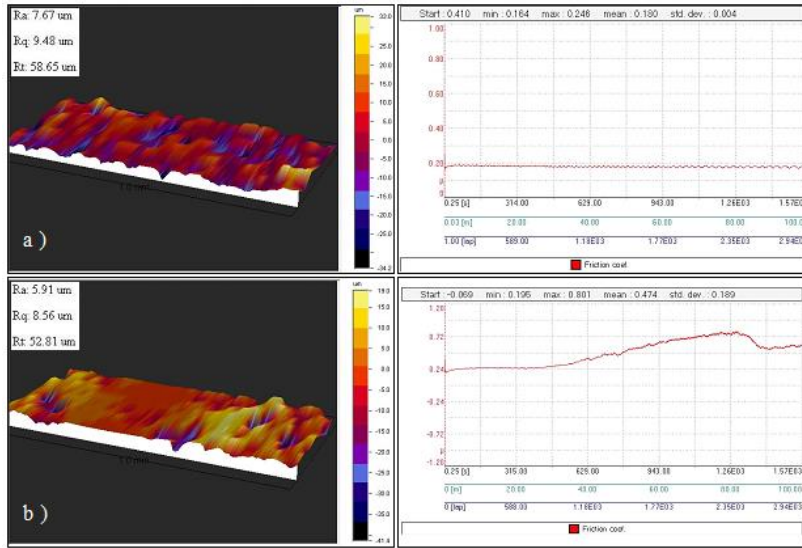
Şekil 6. Kaplama tabakasının sıvı azot içerisinde kırıldıktan sonraki SEM görüntüsü

3.2 Aşınma testleri (Wear Tests)

Alüminyum alaşımı yüzeyleri ball-on-disk aşınma cihazıyla, 6 mm çapında WC bilye ile 1 N yük altında 100 m mesafede aşındırılmıştır. Aşınma deneyleri sonrası numunelerin ortalama sürtünme katsayıları, ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) ve maksimum-minimum yükseklikler arasındaki mesafe (Rt) belirlenmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de farklı lazer güçleri (1000 mm/dak sabit ilerleme hızı, 50-70-100 W lazer gücü) ve ilerleme hızlarında (70 W sabit lazer gücü 300-500mm/dk ilerleme hızı) ana metal ve kaplanmış numunelerin üç boyutlu yüzey haritaları, Ra, Rt değerleri ve ortalama sürtünme katsayılarını gösteren grafikler verilmiştir.

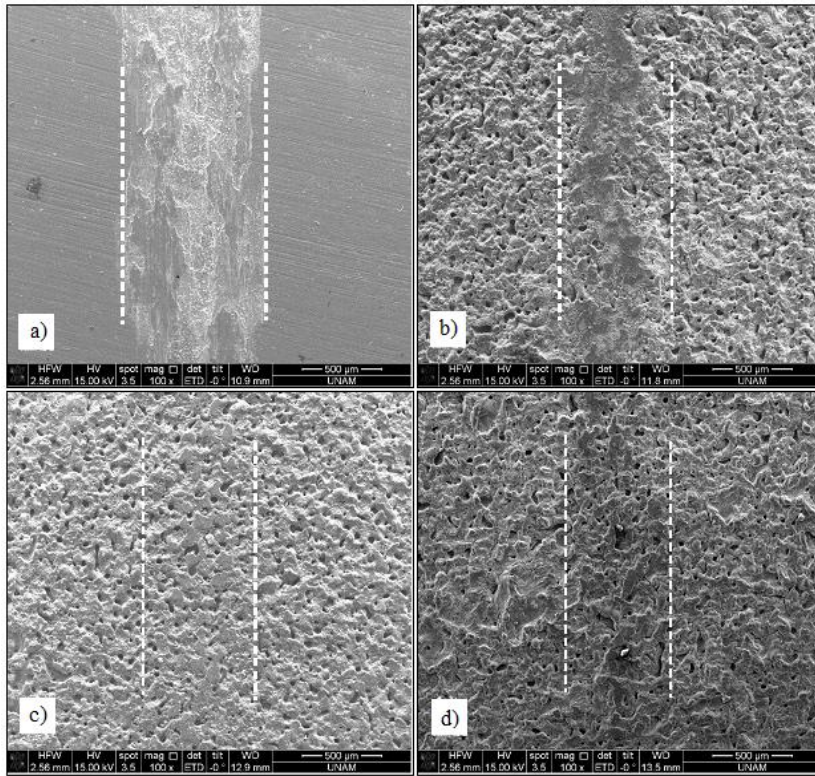


Şekil 7. Farklı lazer güçlerinde yapılan kaplamaların aşınma testi sonuçları (1000 mm/dak sabit ilerleme hızı) a) Ana metal b) 50W, c) 70W, d) 100W

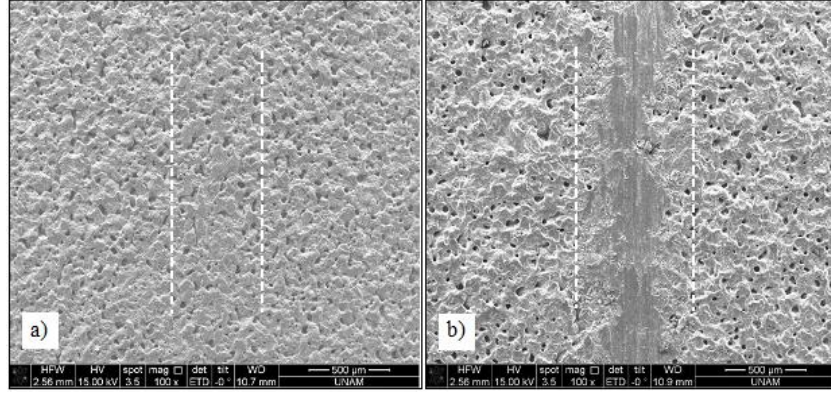


Şekil 8. Farklı lazer ilerleme hızlarında yapılan kaplamaların aşınma testi sonuçları (70 W sabit lazer gücü) a) 300mm/dak, b) 500mm/dak

Kaplanmış AA7075 alüminyum alaşımı malzemelerin üç boyutlu yüzey haritaları incelendiğinde yüzeylerin oldukça pürüzlü olduğu görülmüştür (Şekil 7 ve Şekil 8). Alüminyum alaşımının düşük sıcaklıklarda erimesi ve sonrasında gerçekleşen hızlı soğuma nedeniyle kaplama tabakalarının gözenekli ve dalgalı olmasından dolayı yüksek pürüzlülük değerleri (Ra) ölçülmüştür. Aşındırma testleri sonucunda, kaplama tabakalarının ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) sırasıyla kaplanmamış ana metal, 50, 70 ve 100 W lazer gücünde yapılan kaplamalar için 11.99, 5.40, 6.65 ve 6.08 μm olarak, ortalama sürtünme katsayısı değerleri ise sırasıyla 0.57, 0.386, 0.164, 0.234 bulunmuştur. 300 ve 500 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaplamalarda ise ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) sırasıyla 7.67 ve 5.91 μm olarak ölçülürken, ortalama sürtünme katsayısı değerleri ise sırasıyla 0.180 ve 0.474 olarak bulunmuştur. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, ortalama sürtünme katsayısı yüksek olan numunelerde daha fazla aşınma olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 9). Aşınma testi sonrası yüzeyler SEM analizleri ile incelenmiştir. Şekil 9 ve 10'da aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 9 ve 10 incelendiğinde, kaplanmamış ana metalin, aşınma testinin ilk safhalarında aşındırıcı bilyeye yapıştığı ve adhesiv aşınma davranışı sergilediği, bu nedenle yüksek oranda aşındığı gözlenmiştir. Kaplanmış numunelerde ise sertlik değerlerinde olduğu gibi aşınma dayanımlarında da birbirine oldukça benzer sonuçlar elde edildiği, lazer gücünün artması ile yüzeylerin daha az aşındığı, ilerleme hızının artmasıyla ise azda olsa aşınma dayanımının kötüleştiği tespit edilmiştir. Kapiteli ve arkadaşları 6061 alüminyum alaşımı yüzeyini TiC ile kapladıklarında, ortalama sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü yaklaşık olarak 0.64 ve 13.5 μm olan kaplanmış numunelerin aşınma dayanımının arttığını rapor etmişlerdir [34].



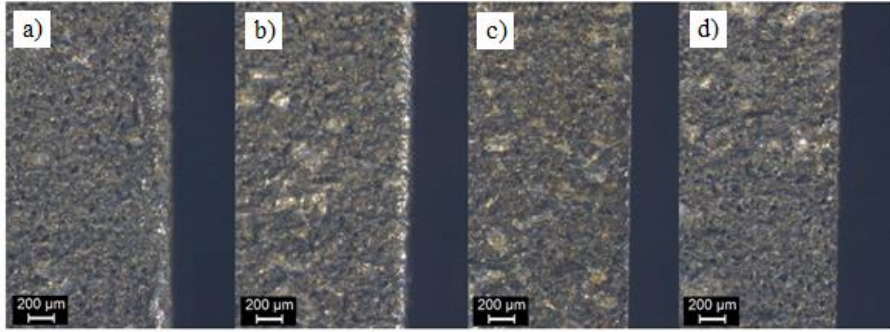
Şekil 9. Farklı lazer güçlerinde kaplanan numunelerin aşınma deneyleri sonrası SEM görüntüleri (1000 mm/dak sabit ilerleme hızı) a) Ana metal b) 50W, c) 70W, d) 100W



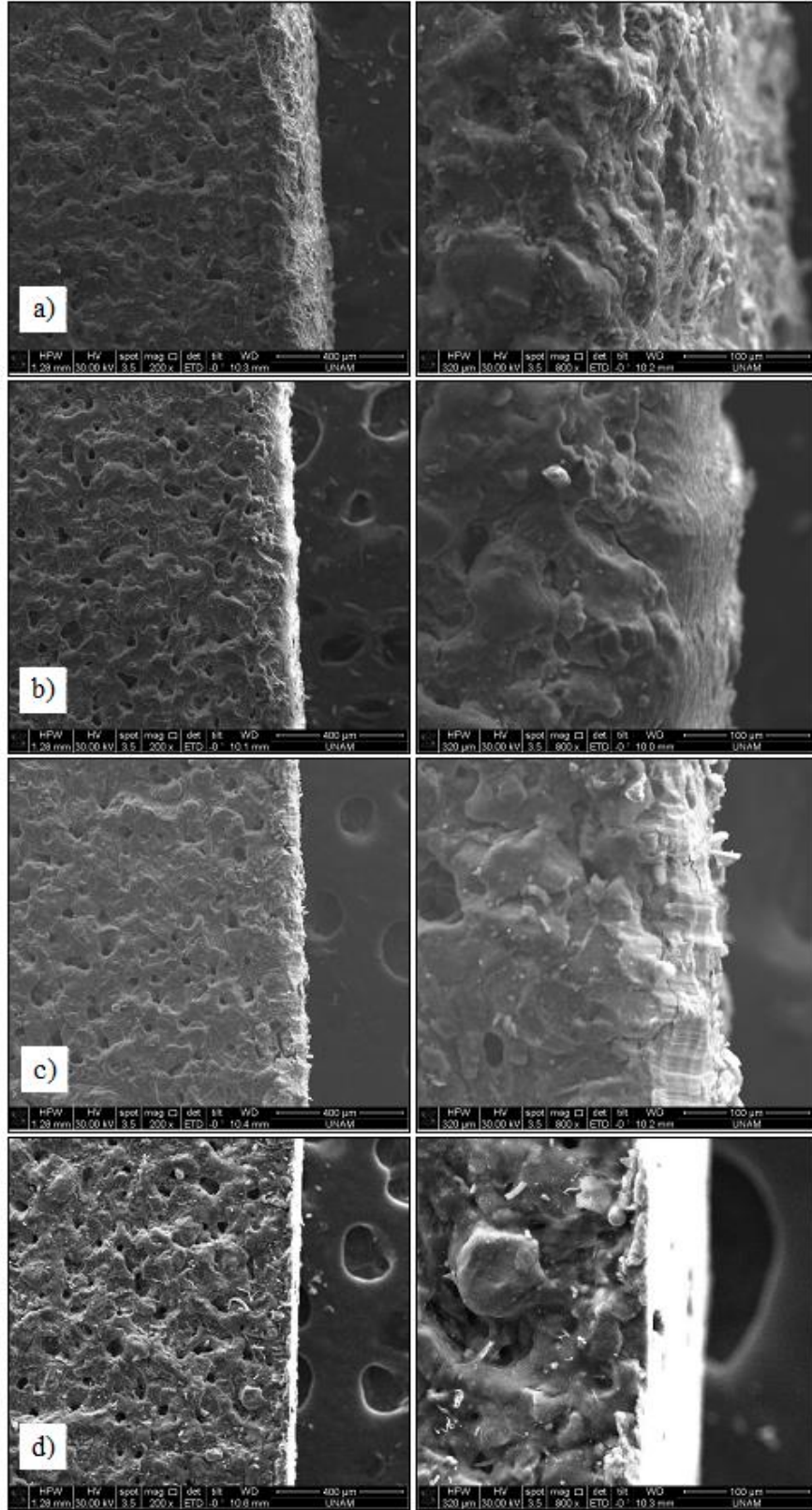
Şekil 10. Farklı lazer ilerleme hızlarında kaplanan numunelerin aşınma deneyleri sonrası SEM görüntüleri (70 W sabit lazer gücü), a) 300mm/dak, b) 500mm/dak

3.3 İşlenebilirlik Deneyleri (Machinability Test)

Kaplanmış AA7075 alüminyum alaşımını malzemeden hazırlanan numunelerin işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için, numuneler sırasıyla aşındırıcı su jeti, lazer ışını, tel erozyon ve aşındırıcı disk ile kesilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12’de 70 W lazer gücünde ve 1000 mm/dak ilerleme hızında kesilen numunelerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri, Şekil 13’te ise kesme işlemleri sonrasında ölçülen mikrosertlik değerleri verilmiştir. Tüm işlenebilirlik deneylerde çok benzer sonuçlar gözlemlendiği için sadece 70 W lazer gücünde ve 1000 mm/dak ilerleme hızında kaplanmış numunelere ait grafiklere yer verilmiştir.



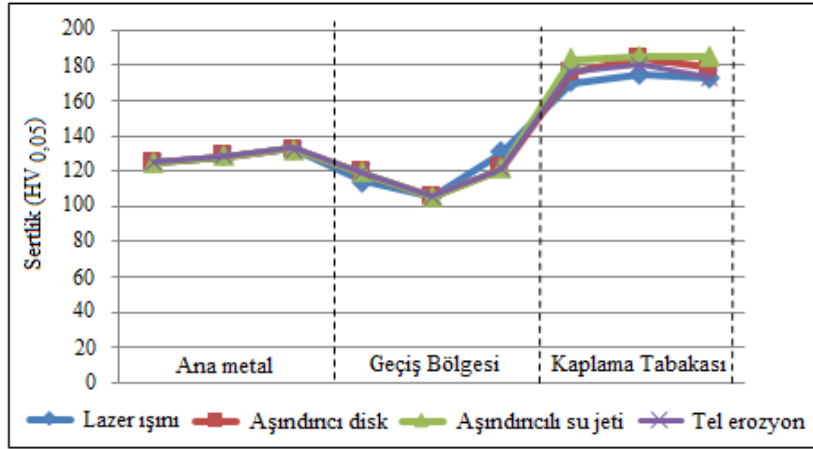
Şekil 11. Lazerle kaplanmış AA7075 alaşımının kesme işlemleri sonrası optik mikroskop (X100) görüntüleri a) Aşındırıcı su jeti, b) Lazer ışını, c) Tel erozyon, d) Aşındırıcı disk



Şekil 12. Lazerle kaplanmış AA7075 alüminyum alaşımının kesme işlemleri sonrası SEM (X200, X800) görüntüleri a) Aşındırıcı su jeti, b) Lazer ışını, c) Tel erozyon, d) Aşındırıcı disk

Şekil 11 ve Şekil 12’de verilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde; en az tahribatın aşındırıcı disk ile kesmede meydana geldiği gözlenmiştir. Aşındırıcı su jeti ile kesmede $\sim 200 \mu\text{m}$, lazer ışını ile kesmede $\sim 120 \mu\text{m}$, tel erozyon ile kesmede $\sim 30 \mu\text{m}$, aşındırıcı disk ile kesmede ise $\sim 15 \mu\text{m}$ ’lik

bölgenin tahrip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 13’de kesme yöntemleri sonrasında elde edilen mikrosertlik grafikleri verilmiştir.



Şekil 13. Farklı kesme yöntemleri ile kesilen numunelerin kesitinden alınan mikrosertlik değerleri

Kaplanan numune yüzeylerinden sertlik ölçümü yapılabilmesi için, her bir kesme numunesi ile elde edilen yüzeylerin mevcut dalgalı (pürüzlü) yapıları sırası ile zımparalama ve parlatma işlemleri ile hazırlanmıştır. Yapılan bu işlemler sonucunda, kesilen kaplama tabakası bir miktar aşındırılmıştır. Hazırlanan yüzeyden alınan sertlik değerlerinin lazer ve tel erozyon ile kesmede etki bölgeleri farklı olsa da sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu, sertlik değişiminin en az aşındırıcı su jeti ile kesme işlemi olduğu tespit edilmiştir (Şekil 13). Genel bir değerlendirme yapıldığında her bir yöntemin kesik yüzey üzerinde kendine özgü bir etkisi söz konusudur. Lazer ışını ve tel erozyon ile kesme yöntemleri; termal kesme yöntemleri olduğundan yüzey üzerinde ısının sebep olduğu deformasyonlar meydana gelirken, aşındırıcı su jeti ile kesmede ise; basınçlı su içerisinde geliştiği güzel dağılmış olan ve belirli bir geometrisi bulunmayan aşındırıcı taneciklerin ve basınçlı suyun etkileri nedeniyle tahribatlar meydana gelmektedir. Belirtilen durumdaki su-aşındırıcı karışımlarının kaplanmış numune yüzeyine çarpmaları ile geliştiği güzel açılarla sıçramaları kaplama tabakası üzerinde kontrolü zor bir deformasyona sebep olmaktadır. Özellikle kaplama yüzeyinin korunması düşünüldüğünde her ne kadar termal bir etkinin olmamasından kaynaklı kaplama özellikleri (yapısı) korunuyor olsa da, kesme bölgesi ve çevresinde aşındırıcı taneciklerin yüzeye batma şeklinde neden olduğu bozuk bir yüzey geometrisi, istenmeyen yüzeylerin oluşumuna sebep olmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşındırıcı disk ile kesme yönteminin en uygun yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmada, AA7075 alaşımı malzeme yüzeyine ZrB₂ nanoparçacıkları ön kaplandıktan sonra CO₂ lazeri ile kaplanmıştır. Lazer gücü ve ilerleme hızı değiştirilerek, bu parametrelerin kaplama tabakası üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk deney setinde 1000 mm/dak sabit ilerleme hızı ile 50, 70 ve 100 W lazer güçlerinde deneyler yapılmıştır. İkinci deney setinde ise 70W sabit lazer gücü ile 300 ve 500 mm/dak tarama hızlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan farklı lazer güçleri ve ilerleme hızlarına rağmen, ZrB₂ ve AA7075 alüminyum alaşımı malzemesinin ergime sıcaklıkları arasındaki farkların yüksek olmasından dolayı tüm kaplama tabakalarında kırıklar ve gözenekler bulunmaktadır. Lazer gücünün artması ile kaplama kalınlıkları ve gözeneklilik artmıştır. 70 W sabit lazer gücünde 300, 500 ve 1000 mm/dak ilerleme hızlarında elde edilen kaplamaların kalınlıkları sırasıyla yaklaşık olarak ~106, 93 ve 87 µm olarak ölçülmüştür. Kaplanmış AA7075 alüminyum alaşımının yüzeyinde Al ve Al₄C₃ fazları tespit edilmiştir. Uygulanan farklı lazer güçleri ve ilerleme hızlarına rağmen elde edilen kaplamaların sertliği birbirine yakın bulunmakla birlikte, en yüksek sertlik değeri 190 HV olarak ölçülmüştür. Kaplanmış numunelerin aşınma dayanımlarında artışlar gözlenmiştir. Farklı yöntemlerle kesilen kaplama tabakalarında, en az tahribatın aşındırıcı disk ile kesmede meydana geldiği tespit edilmiştir. Aşındırıcı su jeti ile kesilen kaplamalı yüzeyde büyük tahribat olduğu bunun sebebinin ise jetin kaplanmış numuneye

temas ettiği ilk bölgede gelişi güzel sıçramadan dolayı kaplama yüzeyinde kesmeden çok kırılmalar meydana getirdiği izlenmiştir. Bu durumda bu tür kaplanmış numunelerin işlenmesi için aşındırıcılığı su jeti ile kesmenin uygun bir yöntem olmadığı ortaya çıkmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Çalışmaya verdiği destek için Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Vagner L. Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 263 (210-216), (1999).
- [2] Liu K, Li YJ, Wang J. In-situ reactive fabrication and effect of phosphorus on microstructure evolution of Ni/Ni-Al intermetallic composite coating by laser cladding, *Materials and Design*, 105 (171-178), (2016).
- [3] Wang CL, Gao Y, Zeng ZC, Fu YK. Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al, *Journal of Alloys and Compounds*, 727 (278-285), (2017).
- [4] Singh A, Ramakrishnan A, Baker D, Biswas A, Dinda GP. Laser metal deposition of nickel coated Al 7050 alloy, *Journal of Alloys and Compound*, 719 (151-158), (2017).
- [5] Yıldırım M, Şimşek İ, Özyürek D. Yaşlandırılmış AA7075 Alaşımında Solüsyona Alma Sıcaklığının Aşınma Performansına Etkisinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (233-239), (2018)
- [6] Avcu E, Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075 T6 Alüminyum Alaşımının Yüzey Altı Özelliklerine Etkileri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (741-752), (2018)
- [7] Sun R, Lei Y. Microstructure and hardness of laser clad SiCp-Al composite coatings on Al alloys, *Materials Letters*, 62 (3272-3275), (2008).
- [8] Schuman TP (2018). *Protective Coatings for Aluminum Alloys (Third Edition)*, *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, USA, 423-448.
- [9] Mandal P, Mondal SC. Investigation of Electro-Thermal property for Cu-MWCNT composite coating on anodized 6061 aluminium alloy, *Applied Surface Science*, 454 (138-147), (2018).
- [10] Hou GL, An YL, Zhao XQ, Zhou HD, Chen JM. Improving interfacial, mechanical and tribological properties of alumina coatings on Al alloy by plasma arc heat-treatment of substrate. *Applied Surface Science*, 411 (53-66), (2017).
- [11] Kashani H, Sohi MH, Kaypour H. Microstructural and physical properties of titanium nitride coatings produced by CVD process, *Materials Science and Engineering A*, 286 (324-330), (2000).
- [12] Li Y, Zhang P, Bai P, Wu L, Liu B, Zhao Z. Microstructure and properties of Ti/TiBCN coating on 7075 aluminum alloy by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 334 (142-149), (2018).
- [13] Yiming C, Guochao G, Huijun Y, Chuanzhong C. Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review, *Optics and Lasers in Engineering*, 100 (23-37), (2018)
- [14] Quan WX, Hong Y, Yong X. Study on Microstructure and Properties of Laser Cladding Al-Ti-C Coating on Aluminum Alloy Surface, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 13 (1258-1264), (2018)
- [15] Toyserkani E. (2005), *Laser cladding*, Boca Raton: CRC press, 1-280.

- [16] Majumdar JD, Li L. Development of titanium boride (TiB) dispersed titanium (Ti) matrix composite by direct laser cladding. *Materials Letters*, 64 (1010-1012), (2010).
- [17] Tomida S, Nakata K. Fe-Al composite layers on aluminium alloy formed by laser surface alloying with iron powder. *Surface and Coatings Technology*, 174 (559-563), (2003).
- [18] Man HC, Zhang S, Yue TM, Cheng FT. Laser surface alloying of NiCrSiB on Al6061 aluminium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 148 (136-142), (2001)
- [19] Xu J, Liu W, Kan Y, M. Zhong, Microstructure and wear properties of laser cladding Ti-Al-Fe-B coatings on AA2024 aluminum alloy, *Materials and Design*, 27 (405-410), (2006)
- [20] Liang GY, Su JY. The microstructure and tribological characteristics of laser-clad Ni-Cr-Al coatings on aluminium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 290 (207-2129), (2000)
- [21] Şimşek T. (2014). Zirkonyum Diborür Nano Kristal Kaplanmış Farklı Malzemelerin Mekanik Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-205.
- [22] Yılbas BS, Al-Aqeeli N, Karatas C. Laser control melting of alumina surfaces with presence of B₄C particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 539 (12-16), (2012).
- [23] Simsek T, Baris M, Chattopadhyay AK, Ozcan S, Akkurt A. Surface Treatment of S355JR Carbon Steel Surfaces With ZrB₂ Nanocrystals by CO₂Laser, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71 (1885-1896), (2018).
- [24] Simsek T, Baris M, Akkurt A. Laser surface treatment of S235JRC carbon steel With Co₂B nanocrystals, *International Journal of Materials Research*, 108 (486-494), (2017).
- [25] Simsek T, Baris M, Ozcan S, Akkurt A. Investigation Of Machinability Properties Of Laser Treated S355JR Carbon Steel With ZrB₂ Nanoparticles, *Turkish Journal of Engineering*, 3 (51-59), 2019.
- [26] Baris M, Simsek T, Akkurt A. Co₂B nanopartikülleri ile Kaplanmış S235JRC karbon çelik malzemelerin farklı kesme yöntemleri ile işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 22 (169-177), (2019).
- [27] Simsek T, İzçiler M, Ozcan S, Akkurt A. Laser Cladding of Hot Work Tool Steel (H13) With TiC Nanoparticles, *Turkish Journal of Engineering*, 3 (25-31), (2019).
- [28] Iwatani S, Ogata Y, Uenishi K, Kobayashi KF, Tsuboi A. Laser cladding of Fe-Cr-C Alloys on A5052 Aluminum Alloy Using Diode Laser, *Materials Transactions*, 46 (1341-1347), (2005).
- [29] Quyang JH, Nowotny S, Richter A, Beyer E. Laser cladding of yttria partially stabilized ZrO₂ (YPSZ) ceramic coatings on aluminum alloys, *Ceramics International*, 27 (15-24), (2001).
- [30] Fu Y, Batchelor AW. Laser alloying of aluminum alloy AA 6061 with NiCr. Part II. The effect of laser alloying on the fretting wear resistance, *Surface and Coatings Technology*, 102 (119-126), (1997).
- [31] Yılbas BS, Akhtar SS, Karatas C. Laser carbonitriding of alumina surface, *Optics and Lasers in Engineering*, 49 (341-350), (2011).
- [32] Almeida A, Anjos M, Vilar R, Li R, Ferreira MG, Steen WM, Watkins KG. Laser alloying of aluminium alloys with chromium, *Surface and Coatings Technology*, 70 (221-229), (1995).
- [33] Sun R, Lei Y. Microstructure and hardness of laser clad SiCp-Al composite coatings on Al alloys, *Materials Letters*, 62 (3272-3275), (2008).
- [34] Katipelli L.R, Agarwal A, Dahotre N.B, Laser surface engineered TiC coating on 6061 Al alloy: microstructure and wear, *Applied Surface Science*, 153 865-78), (2000).