

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI YÖNTEMLERLE TİTANYUM ALÜMİNYUM İNTERMETALİK
KAPLAMA OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Okan GÖK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI YÖNTEMLERLE TİTANYUM ALÜMİNYUM İNTERMETALİK
KAPLAMA OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Okan GÖK
(506131424)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506131424 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Okan GÖK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**FARKLI YÖNTEMLERLE TİTANYUM ALÜMİNYUM İNTERMETALİK KAPLAMA OLUŞTURULMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erdem ATAR**
Gebze Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2016**
Savunma Tarihi : **06 Haziran 2016**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren, tecrübesini benimle paylaşan ve her zaman kendimi geliştirmem için bana destek olan değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na,

Tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan Arş. Gör. Onur TAZEGÜL'e,

Zor anlarımda benimle olan ve beni yalnız bırakmayan Altan Erdem ALAS, Gizem ŞENYURT, Ahmet Özkan ve Serhat ÇOBAN'a,

Tüm hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini eksik etmeyen babam Yüksel GÖK, annem Feriha GÖK ve ablam Gökçen GÖK'e,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada kullanılan lazer uygulaması LAZERTEC firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Lazer uygulaması konusunda yardımlarından dolayı Ferhat DURUKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2016

Okan GÖK
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI.....	3
2.1 Titanyumun Genel Yapısı ve Özellikleri	3
2.2 Titanyum Alüminyum Alaşımları	6
2.2.1 Ti ₃ Al.....	7
2.2.2 TiAl	8
2.2.3 TiAl ₃	9
2.2.4 TiAl ₂	10
3. SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ (SGDP)	11
3.1 SGDP Tanımı ve Tarihçesi	11
3.2 İşlem Parametreleri	12
4. LAZER YÜZEY MODİFİKASYONU.....	15
4.1 Lazer ve Lazer Işınlарının Malzemeler ile Etkileşimi.....	15
4.2 Lazer Uygulamalı Kaplamalar	17
4.3 Lazer Yüzey Ergitme	18
4.3.1 İşlem parametreleri	20
4.3.2 Lazer yüzey ergitmenin avantajları.....	20
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	21
5.1 Kaplama Oluşturma İşlemleri	22
5.1.1 Soğuk gaz dinamik püskürtme.....	22
5.1.2 Isıl işlem.....	23
5.1.3 Lazer uygulaması	23
5.2 Karakterizasyon İşlemleri	23
5.2.1 Metalografik numune hazırlanması	23
5.2.2 Mikroyapı analizleri.....	24
5.2.3 Yüzey ve kesit sertlik ölçümleri (HV)	24
5.2.4 X-Işınları difraksiyon analizleri (XRD).....	24
5.2.5 Aşınma deneyleri	24
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	27
6.1 Mikroyapı İncelemeleri	27
6.2 Sertlik Ölçümleri.....	31
6.2.1 Yüzey sertlik ölçümleri.....	31
6.2.2 Kesit sertlik ölçümleri.....	32
6.3 Kaplamaların Tribolojik Özellikleri.....	33

6.3.1 Sürtünme katsayısı değişimi.....	33
6.3.2 Aşınma hacmi.....	33
6.3.3 Aşınma yüzeyleri.....	34
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKLAR.....	39
EKLER.....	41
ÖZGEÇMİŞ.....	47

KISALTMALAR

HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HPDL	: High Power Diode Laser
Nd:YAG	: Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
SGDP	: Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme
SPH	: Sıkı Paket Hekzagonal
TMCA	: The Titanium Metals Company of America
XRD	: X-ışınları Difraksiyonu
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

SEMBOLLER

D	: Aşınma İzi Derinliği
G	: Aşınma İzi Genişliği
L	: Aşınma İzi Uzunluğu
V	: Aşınma İzi Hacmi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Titanyumun fiziksel özellikleri	3
Çizelge 2.2 : Titanyumun diğer metallerle karşılaştırmalı bazı özellikleri	3
Çizelge 2.3 : Alaşım elementlerinin titanyum alaşımlarının mikroyapıları üzerine etkileri	6
Çizelge 2.4 : Ti_3Al ve $TiAl$ bazlı alaşımların titanyum alaşımları ve nikel bazlı superalaşımlar ile karşılaştırılması.....	9
Çizelge 4.1 : Mevcut lazer prosesleri ve temel uygulamalar	15
Çizelge 5.1 : Deneysel çalışmalar dahilinde hazırlanan numuneler	22
Çizelge 6.1 : Farklı yükler altında çatlak oluşum başlangıcı	32
Çizelge A.1 : Aşınma testlerinde elde edilen sürtünme katsayı değerleri	42
Çizelge B.1 : Numune 2'ye ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi.....	44
Çizelge B.2 : Numune 3'e ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi	44
Çizelge B.3 : Numune 4'e ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi	44
Çizelge B.4 : Numune 5'e ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Titanyumun kristal yapıları. (a) α fazı kafes yapısı (b) β fazı kafes yapısı ..	5
Şekil 2.2 : Ti-Al sisteminin denge-faz diyagramı.....	7
Şekil 3.1 : Genel bir SGDP sistemi	11
Şekil 3.2 : (a) Al partikülleri (b) 730 m/s (c) 780 m/s (d) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partiküllerinin etkisi	13
Şekil 3.3 : Lazer saçılma metoduyla çekilen toz yörünge fotoğrafları. Silindir ve küre gövde çapı yaklaşık 8mm (a) kama yarığı ve Al parçacıkları (b) silindir ve Al parçacıkları (c) küre ve Al parçacıkları (d) küre ve akrilik cam parçacıkları	14
Şekil 4.1 : (a) işlem görmemiş, (b) lazer yüzey ergitilmiş (600W güç, 6 mm/s tarama hızı ve 5 l/min gaz akış hızı) Ti-6Al-4V taramalı elektron fotoğrafları verilmiştir.....	16
Şekil 4.2 : Piyasadaki lazer proseslerinin uygulama alanları üzerine ortalama güç ve dalga boylarına göre sınıflandırılması	17
Şekil 4.3 : Al-9 wt%Si alaşımının kesit görüntüleri: (a) lazer tekrar-ergitilmiş, (b) altlık ve işlenmemiş numune, (c) işlenmemiş bölge ile lazer tekrar-ergitilmiş bölge arayüzeyi.....	19
Şekil 5.1 : Numunelerin makro görüntüleri. (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3 (d) Numune 4 (e) Numune 5 (f) Numune 6	22
Şekil 5.2 : Aşınma izi derinliği, genişliği ve alanın şematik olarak gösterimi	25
Şekil 6.1 : (a) Numune 2 ve (b) Numune 3'e ait kesitten mikroyapı görüntüleri.....	27
Şekil 6.2 : (a) Numune 2 ve (b) Numune 3'e ait XRD grafikleri.	28
Şekil 6.3 : (a) Numune 4 ve (b) Numune 5'e ait kesitten mikroyapı görüntüleri.....	29
Şekil 6.4 : (a) Numune 4 ve (b) Numune 5'e ait XRD grafikleri	30
Şekil 6.5 : Numune 4 yüzeyinde karşılaşılan farklı yapıdaki bölgenin görüntüleri .	30
Şekil 6.6 : Yüzeyden 10g ile ölçülen mikro Vickers sertlik değerleri ortalamaları .	31
Şekil 6.7 : Enine kesitten 10g ile ölçülen mikro Vickers sertlik değerleri ortalamaları..	32
Şekil 6.8 : Farklı yüklerde kararlı sürtünme katsayısı değerleri	33
Şekil 6.9 : Numunelerin farklı yükler altında aşınma hacimleri.....	34
Şekil 6.10: Farklı yükler altında aşınma yüzeylerinin x100 ve x2000 büyütme SEM görüntüleri, (a) Numune 2, (b) Numune 3, (c) Numune 4, (d) Numune 5.....	35
Şekil 6.11: Aşınma deneyinde kullanılan Al ₂ O ₃ toza ait aşınma izlerinin x100 büyütmede optik mikroskop görüntüleri, (a) Numune 2, (b) Numune 3, (c) Numune 4, (d) Numune 5.....	35
Şekil A.1 : Numunelerin farklı yükler altında sürtünme katsayılarının zamana göre değişimi.....	41
Şekil B.1 : Numune 2'nin 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.....	43

Şekil B.2 : Numune 3'ün 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.....	43
Şekil B.3 : Numune 4'ün 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.....	43
Şekil B.4 : Numune 5'in 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.....	43

FARKLI YÖNTEMLERLE TİTANYUM ALÜMİNYUM İNTERMETALİK KAPLAMA OLUŞTURULMASI

ÖZET

Titanyum ve alaşımları sahip oldukları yüksek dayanım/ağırlık oranı, düşük sıcaklıklarda korozyona karşı mükemmel direnç göstermeleri ve oldukça yüksek tokluk sergilemeleri nedeniyle otomotiv, havacılık, denizcilik, kimya vb. pek çok sektörde geniş ölçüde kullanım alanı bulmaktadır. Ancak, yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı yeterli direnç gösterememeleri ve yüksek sürtünme katsayıları ile adhesif karakterde aşınma sergilemeleri, titanyum ve alaşımlarının mühendislik uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu nedenle aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi ve oksijen absorpsiyonunun azaltılması için titanyum ve alaşımlarına çeşitli yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmaktadır.

Ti-Al sistemindeki intermetalik fazların koruyucu kaplamalar olarak kullanılabileceği literatürde bulunan çalışmalar tarafından desteklenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda titanyum ve alaşımlarından çok daha üstün oksidasyon direnci ve mekanik özellikler sergilemeleri nedeniyle Ti-Al bazlı intermetalikler, yüksek sıcaklık uygulamalarına aday malzemeler olarak görülmektedir.

Çalışmamızda titanyum altlık üzerine, soğuk gaz dinamik püskürtme (SGDP) yöntemiyle, saf alüminyum ve titanyum-alüminyum toz karışımı kullanılarak iki farklı kaplama yapılmış ve bu kaplamalarda ısıtma işlemi ve lazer yüzey ergitme uygulamaları ile titanyum-alüminyum intermetalikleri oluşturulması hedeflenmiştir. Isıtma işlemi 10^{-3} bar vakum altında ve 750°C 'de 24 saat süreyle uygulanmış ve numuneler fırında soğutulmuştur. Lazer ergitme için 77W güç, 5Hz frekans, 100mm/s hız parametreleri seçilerek numunelere 6 paso sürekli CO_2 lazer uygulanmıştır.

Çalışma kapsamına hazırlanan 6 grup numuneden Al kaplama sonrası lazer ergitme uygulanacak numunelerde, SGDP uygulaması ardından, kaplamalarda atma olması sonucu çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu numuneler kullanılamamıştır. Ayrıca Ti-Al kaplama sonrası ısıtma işlemi ve lazer yüzey ergitme uygulanan numuneler de lazer uygulaması sonrası yoğun çatlak oluşumu ile kaplamaların altlıktan çatlak bölgelerinde ayrılması sonucu deneysel çalışmalarda kullanılamamıştır.

Kaplamalar mikroyapı incelemeleri, XRD analizleri ve sertlik ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Ayrıca aşınma testi uygulanarak kaplamaların tribolojik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Uygulanan testler ve yapılan analizler sonucu tüm kaplamalarda intermetalik dönüşümün gerçekleştiği görülmüştür. Isıtma işlemi numunelerinde %100 TiAl_3 fazı elde edilirken lazer uygulanan numunelerde TiAl_3 fazına ek olarak düşük şiddetli piklerde TiAl , TiAl_2 , Ti_3Al ve Ti_3Al_2 fazlarına da rastlanmıştır. Bu fazların, lazer uygulaması sırasında çıkan yüksek sıcaklıklar sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

FORMATION OF TITANIUM ALUMINIUM INTERMETALLIC COATINGS BY DIFFERENT METHODS

SUMMARY

Cold gas dynamic spray is an emerging coating technology based on the use of supersonic gas jet to accelerate (up to 1000 m/s) and to impact a powder, with the size ranging from 1 to 50 μm in diameter, on a substrate. Due to the high speed, during the impact, the powder undergoes a severe plastic deformation such that it adheres on the substrate. Thanks to this method, it is possible to produce up to fully dense metallic coatings on substrates of different materials. With this technology, different kinds of powder (metals, polymers, ceramics, composite materials and nanocrystalline powders) or their mixing can be deposited. Among the various possible powders that can be deposited by cold gas dynamic spray, titanium is one of the most attractive materials thanks to its potential applications.

Titanium and its alloys are widely used in automobile, aerospace, marine and chemical industries. Such a wide range of applications is related to high strength to weight ratio, excellent corrosion resistance and reasonably good toughness of titanium alloys. However, titanium and titanium alloys exhibit poor frictional resistance due to high friction coefficient and adhesive welds that are formed on their surface and insufficient resistance to oxidation at elevated temperatures. In order to improve wear resistance and to reduce absorption of oxygen, titanium and its alloys are subjected to various surface treatments.

The available experimental data show that the aluminide phases of the Ti-Al system can be used as protective coatings for titanium alloys. Intermetallic compounds of the Ti-Al system have been considered extensively for high-temperature applications because they offer good oxidation resistance and high mechanical properties at temperatures higher than those possible with titanium and titanium alloys.

The aim of this research is to form a Ti-Al intermetallic layer on titanium substrate with pure aluminum and titanium-aluminum cold gas dynamic sprayed coatings by heat treatment and laser surface melting..

Commercially pure titanium substrates were used in this study. The coating technique used in this study is cold gas dynamic spray process. Heat treatment samples were annealed in vacuum of 10^{-3} bar and 750°C temperature then cooled in the furnace. In all cases annealing time was 24h. Laser surface melting is performed using continuous CO₂ laser under 77W, 5Hz, 100mm/s and 6 pass as parameters. Parameters of laser surface melting process were investigated experimentally in order to form a better coating layer on the substrates.

Within the context of this study, 6 different group of samples were prepared. But separation of coating from substrate after laser process is observed on the laser surface melted sample with pure Al coating,. Also in the case of heat treated then laser melted sample with Ti+Al mixture coating, extreme crack propagation through

thickness is observed. These 2 specimens could not be used in the further stages of this study

As for characterization of the coated samples; cross-sectional microstructures of coatings were studied by optical microscopy. Phase compositions of coatings determined via X-ray diffraction (XRD) analysis. Micro hardness investigations both from surface and cross-section are held using micro hardness tester. Then wear tests were performed and the tribological properties of coatings were compared. Wear rates are calculated from the wear track depth, length and width using profilometer.

Phase identification was carried out by a GBC MMA 027 X-ray diffractometer (XRD) using CuK_α radiation. The samples were scanned over 1° angles of $10\text{-}90^\circ$ at a step of 0.02° and a scanning speed of $2^\circ/\text{min}$. Results of the analysis showed that the intermetallic transformation occurred in all coatings. Annealing of both pure Al and Ti-Al mixed coatings resulted in the formation of the TiAl_3 compound. As for the laser remelted coatings, other Ti-Al intermetallic compounds such as TiAl , TiAl_2 , Ti_3Al ve Ti_3Al_2 with low intensities were formed aside from TiAl_3 . Formation of these intermetallic phases were caused by the high temperatures of laser process.

Microstructures of the coatings were investigated by LEICA type optical microscopy. Cross sectional pictures of coatings showed that homogeneous microstructures with low porosity were obtained in all cases except for one specimen with laser surface melted Ti-Al coating which laser could not penetrate throughout the coating from surface to substrate. Also an eutectic solidification region was observed on several parts of the surface of laser surface melted Ti-Al coating.

Additionally, it was shown that there were some micro cracks lying throughout the coating from surface to interface. These cracks are interpreted as the result of thermal expansion coefficient differences and cooling rate. Moreover in the cross-section images of the heat treated sample with pure Al coating, cracks parallel to coating surface were observed in the mid-thickness region where the amount of porosity is increased.

Both cross-sectional and surface hardness tests conducted out with a Vickers pyramid indenter using BUEHLER TUKON 1102 type micro-hardness tester. Hardness measurements were performed under 10 gr load and hardness values were taken as the average of a minimum of 10 measurements. As a result, it was measured that hardness is averaged 558 VHN on the surface and 553 on the cross-section of coatings. Heat treated sample with pure Al coating showed the highest hardness on both the surface and the cross-section of coating.

Furthermore, in order to form an opinion about brittleness of coatings, hardness measurements were performed on the surface under 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500 and 1000g loads then the loads that formation of cracks occurred are determined.

Finally wear tests were conducted under 1N and 3N loads via TRIBOTECH reciprocating tribotester device. To compare the wear resistances of coatings, wear tracks were scanned using Veeco Dektak 6M type profilometer and the wear rates were calculated. Also SEM images of wear tracks were examined along with the optical microscopy images of the Al_2O_3 balls. Micro abrasion and cracks were observed in all the samples except laser surface melted Ti-Al coating which has the lowest friction coefficient. This out come is thought to be the result of the eutectic solidification regions acting like a lubricant.

Crack formation in the structure of the coatings and failing to penetrate throughout the coating from surface to interface with laser are thought to be the paramount deficiency of this study. In all the studies using these material couples, this type of cracks are observed. There are certain treatments that are suggested to prevent crack formation in the literature. Penetration throughout the coating can be achieved by using a higher power laser. Also, in the case with the same parameters used in this study, forming thinner coatings is recommended.

1. GİRİŞ

Soğuk gaz dinamik püskürtme (SGDP) prosesi, boyutları 1-50 μm arasında değişen tozların bir gaz jeti aracılığıyla altlık yüzeyine süpersonik hızlarla (1000 m/s'ye kadar) çarptırılmasına dayanan ve gelişmekte olan bir kaplama yöntemidir. Çok yüksek hızlara ulaşılması nedeniyle, çarpma sırasında, tozların yüzeye yapışmasına neden olan yoğun bir plastik deformasyon gerçekleşir. Bu yöntem sayesinde farklı altlık malzemeleri üzerine çok yüksek yoğunluklarda metalik kaplamalar elde edilebilmektedir. Farklı türde tozlar (metal, polimer, seramik, kompozit malzemeler ve nanokristalin tozlar) ve onların karışımları da bu teknoloji ile kaplanabilmektedir. Bu yöntemle kaplanabilen çeşitli tozlar arasında en çok ilgi çeken, potansiyel uygulama alanları nedeniyle, titanyumdur [1].

Titanyum ve alaşımları, mükemmel mekanik özellikleri (yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı) ve kimyasal kararlılığı (korozyon direnci) nedeniyle otomotiv, havacılık ve uzay teknolojileri endüstrisinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Ancak titanyum alaşımlarının zayıf tribolojik özellikleri ve oksidasyon direnci (yüksek sıcaklıkta) onların olası kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [2,3].

Literatürde bulunan deneysel veriler Ti-Al sistemindeki intermetalik fazların endüstriyel titanyum alaşımlarında koruyucu kaplamalar olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ti-Al bazlı intermetalik bileşikler yüksek sıcaklıklarda geleneksel titanyum alaşımlarından çok daha üstün oksidasyon direnci ve mekanik özellikler sergilemeleri nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarına aday malzemeler olarak görülmektedir. Özellikle Ti_3Al , TiAl ve TiAl_3 fazları altlığa oldukça iyi tutunma sergilemekte olup titanyum alaşımlarının yüzey sertliğini ve aşınma direncini iyileştirebilmektedir. [2,3,4]. Malzemelerin aşınma direncini iyileştirmek için pek çok yüzey modifikasyon yöntemi geliştirilmiştir [2].

Yüzey modifikasyonu, malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirerek sert çevre şartlarında servis ömürlerini uzamak için etkili bir yöntemdir [5]. Ayrıca, SGDP prosesi ile elde edilen kaplamalarda karşılaşılabilen porozite, yüksek pürüzlülük ve düşük mekanik özellikler gibi problemlere karşı, kaplama sonrası, lazer yüzey

ergitme işlemi olası bir çözüm olarak görülmektedir [1]. Lazer yüzey ergitme uygulaması çeşitli metallerin aşınma ve korozyon özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda aktif olarak uygulanmakta olup titanyum ve alaşımlarının lazer yüzey eritmesine dair literatürde çalışmalar bulunmasına karşın SGDP uygulamaları konusunda araştırmalar devam etmektedir [1,5]

Bu tez çalışmasında titanyum ve alaşımlarının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda saf titanyum yüzeyinde soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle saf alüminyum tozu ve titanyum-alüminyum toz karışımı kullanılarak kaplamalar elde edilmiştir. Hazırlanan kaplamaların ısıtılma ve lazer yüzey eritme yöntemleri ile intermetalik dönüşüm geçirmeleri sağlanarak aşınma, sürtünme, sertlik gibi yüzey özelliklerindeki değişim karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

2.1 Titanyumun Genel Yapısı ve Özellikleri

Titanyum elementinin gezegenimizin yanı sıra meteorlar, ay ve diğer yıldızlarda da bulunduğu tespit edilmiştir. Titanyum, %0.6 gibi bir oran ile yer kabuğunda alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra en yaygın bulunan elementtir [6,7]. Titanyumun önemli fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Titanyumun fiziksel özellikleri [7].

Element Adı	Sembol	Atom Numarası	Atom Ağırlığı (gr)	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
Titanyum	Ti	22	47.9	4.51	1812	3130

En hafif ağır metal olan titanyum, oldukça yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Titanyumun temel özelliklerinin diğer metaller ile karşılaştırılması Çizelge 2.2’de verilmiştir[8].

Çizelge 2.2: Titanyumun diğer metallerle karşılaştırmalı bazı özellikleri [8].

Özellikler	Ti	Fe	Ni	Al
Ergime Noktası (oC)	1670	1538	1455	660
Kristal Yapı	HMK, HSP	YMK, HMK	YMK	YMK
Elastiklik Modülü	115	215	200	72
Yoğunluk (g/cm3)	4.5	7.9	8.9	2.7
Korozyon Direnci	Çok Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Oksijene Reaktiflik	Çok Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek
Fiyat	Çok Yüksek	Düşük	Yüksek	Orta

Titanyum ve alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci ve oldukça yüksek tokluk sergilemesi nedeniyle havacılık, denizcilik ve kimya

sektörlerinde geniş ölçüde kullanım alanı bulmaktadır. İlk ticari ürün 1950 yılında The Titanium Metals Company of America (TMCA) tarafından üretilmiştir. O tarihten itibaren titanyum ve alaşımları havacılık, denizcilik ve diğer endüstriyel uygulamalarda teknik açıdan üstün ve uygun maliyetli malzemeler olduklarını kanıtlamıştır [6,7,9].

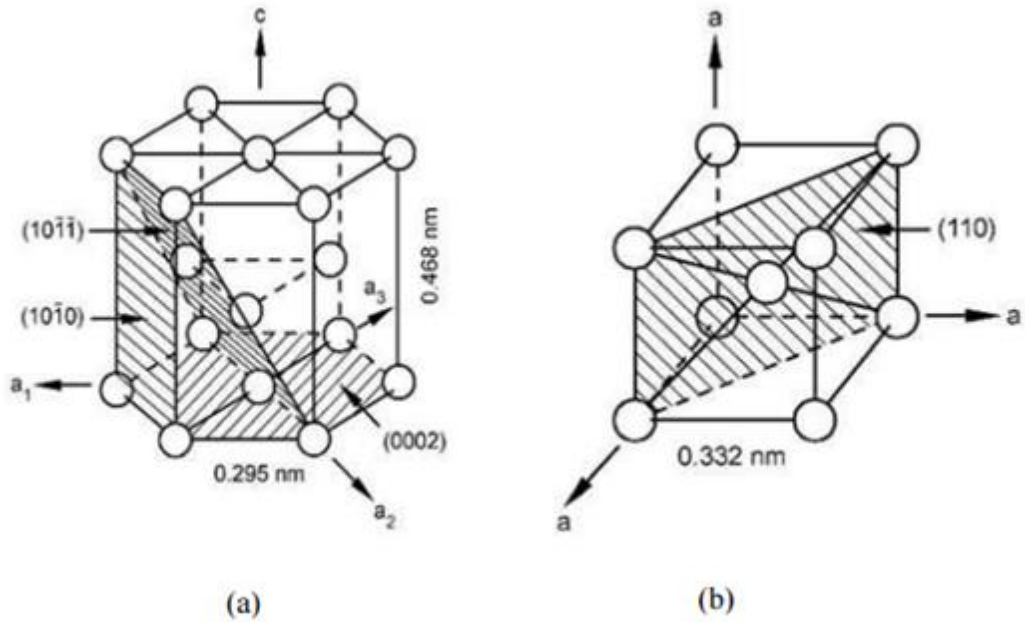
Titanyumun mühendislik açısından önem taşıyan en temel karakteristik özellikleri şu şekilde sıralabilir [7]:

- Üstün dayanım/ağırlık oranı – Mevcut ticari titanyum bazlı alaşımların yoğunlukları $4.42 - 4.85 \text{ g/cm}^3$ aralığında değişim göstermektedir. Akma dayanımı ise ticari saflıktaki (Cp) 1. Kalite titanyum için 172 MPa iken ısıtılma işlem görmüş beta (β) alaşımları için 1380 MPa gibi bir değere çıkabilmektedir.
- Mükemmel korozyon direnci – Titanyum tuzlu su ve deniz atmosferlerinin korozyon özelliklerinden etkilenmemektedir. Ayrıca asit ve bazlar, doğal sular ile kimyasalların büyük bir kısmına karşı da olağanüstü direnç sergilemektedir.
- Üstün erozyon direnci – Titanyum ve alaşımları erozyon, kavitasyon ve akış korozyonuna karşı üstün direnç göstermektedir ve titanyum öncesinde ısı değiştirici tüplerde kullanılan bakır-nikel alaşımlarından çok daha iyi korozyon ve erozyon direnci sergilemektedir.
- Yüksek ısı transfer verimi – Çalışma koşullarında gemici pirinci ve bakır-nikel alaşımlarına yakın ısı transfer özelliklerine sahiptir.
- Oda sıcaklığı ve düşük sıcaklıklarda üstün oksidasyon direnci – Titanyum, yüzeyinde bulunan ince film şeklindeki koruyucu oksit tabakası sayesinde oda sıcaklığında oldukça yüksek oksidasyon direncine sahiptir.

Ancak diğer metallerde olduğu gibi titanyum ve alaşımlarının da eksik yönleri bulunmaktadır. Titanyum ve alaşımları nispeten yüksek sürtünme katsayıları ve adhesif karakterde yüzey aşınması sergilediğinden zayıf aşınma özellikleri sergilemektedir. Ayrıca titanyum ve alaşımlarının çoğunda 500°C ve üzeri çalışma sıcaklıklarında oksitlenmeye bağlı olarak mekanik özelliklerde düşüş görülmektedir. Aşınma ve yüksek-sıcaklık oksidasyon dirençlerinin zayıf olması, bu malzemelerin,

tribolojik bileşenlerin mühendisik uygulamaları ve atmosferik şartlarda yüksek sıcaklık ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$) uygulamalarında kullanılmasına engel olmaktadır. Aşınma dayanımı ve oksidasyon direncini arttırmak amacıyla titanyum ve alaşımlarına çeşitli yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmaktadır [6,9,10].

Titanyum, iki farklı kristal yapıda bulunabilen allotropik bir malzemedir (Şekil 2.1). Bu yapılar; sıkı paket hekzagonal (SPH) yapıda olan alfa (α) ile hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki beta (β) fazlarıdır. Alaşımlanmamış titanyumda $883\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar α fazı kararlıyken bu değerin üzerindeki sıcaklıklara çıktığında β fazına dönüşmektedir. Saf titanyumda bu sıcaklık “ β dönüşüm sıcaklığı” olarak adlandırılmaktadır. β fazı ergime noktasına kadar kararlı yapıdadır [7,8].



Şekil 2.1: Titanyumun kristal yapıları. (a) α fazı kafes yapısı (b) β fazı kafes yapısı [8].

Titanyumun alaşımlanması ile α - β dönüşüm sıcaklığı değiştirilebilmekte ve bu iki fazdan birinin kararlı hale gelmesi sağlanarak alaşımdaki faz miktarları kontrol edilebilmektedir. α -dengeleyici olarak bilinen elementler β dönüşüm sıcaklığını yükseltirken β -dengeleyici elementler bu sıcaklığı düşürmektedir. Yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerinden bir kısmının titanyumun mikroyapısına etkileri Çizelge 2.3’de verilmiştir [7].

Çizelge 2.3: Alaşım elementlerinin titanyum alaşımlarının mikroyapıları üzerine etkileri [7]

Alaşım Elementi	Alaşımlama Oranı (wt. %)	Yapıdaki Etkisi
Alüminyum	2-7	α - Dengeleyici
Kalay	2-6	α - Dengeleyici
Vanadyum	2-20	β - Dengeleyici
Molibden	2-20	β - Dengeleyici
Krom	2-12	β - Dengeleyici
Bakır	2-6	β - Dengeleyici
Zirkonyum	2-8	α ve β Güçlendirici
Silisyum	0.2-1	Sürünme Direncini İyileştirir

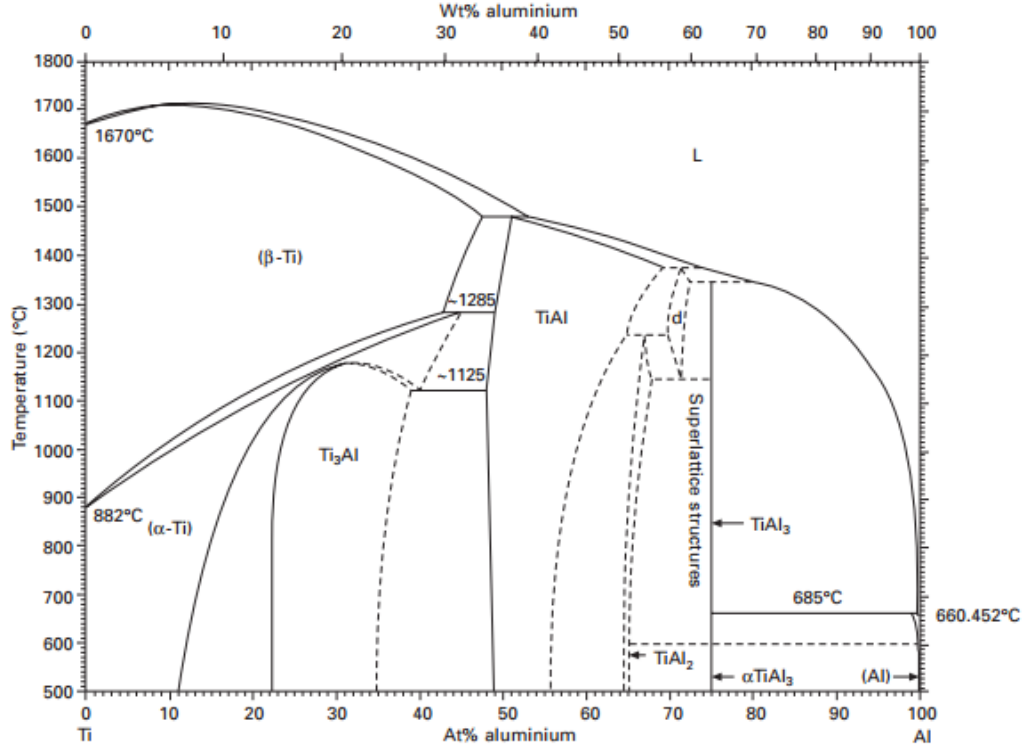
2.2 Titanyum Alüminyum Alaşımları

İntermetalik fazlar – ya da intermetalikler – kristal yapıları ana malzemelerinden farklılık gösteren metalik bileşikler olarak tanımlanmaktadır.

Yapısal uygulamalar için malzeme seçiminde son gelişmeler iki hedefe odaklanmıştır. Bunlardan biri, mukavemette kayıp yaşanmadan çalışma sıcaklığını arttırmak, diğeri ise hareketli parçaların çalışma hızını arttırmak ya da ağırlığını azaltmak amacıyla yüksek spesifik mukavemete sahip hafif malzemeleri tercih etmektir.

Bu açıdan modern seramik malzemeler düşük yoğunluk ile birlikte yüksek mukavemet sunmaktadır. Ancak bu metalik olmayan malzemeler metalik yapılara eklendiğinde ciddi uyumluluk sorunları ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle metalik alaşımlar ile seramiklerin arasındaki açığı kapatan intermetalik fazlara olan ilgi artmaktadır. Bu fazların özellikleri ne kadar metalik ise o kadar avantajlı olarak görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında hafif metallerin yerine intermetaliklerin kullanımı büyük ölçüde ilgi çekmektedir. Düşük yoğunluk ($3.8 - 4.0 \text{ g/cm}^3$) ve yüksek ergime sıcaklığına (1460°C) sahip TiAl fazı üzerine yapılan çalışmalar başarılı sonuç vererek 900°C 'ye kadar olan uygulamalarda yeterli sürünme özellikleri ve oksidasyon direnci sağlayan TiAl bazlı alaşımlar geliştirilmiştir [11].

Şekil 2.2’de tial sistemindeki faz dengesinin yakın zamandaki durum bilgisi gösterilmektedir. Bu sistemde yedi adet intermetalik faz bulunmaktadır. Bunlar; Ti_3Al (α_2), $TiAl$ (γ), $Ti_{1-x}Al_{1+x}$, $TiAl_2$ (düşük ve yüksek sıcaklık polimorf), Ti_5Al_{11} , Ti_2Al_5 ve $TiAl_3$ fazlarıdır. $Ti_{1-x}Al_{1+x}$, Ti_5Al_{11} ve Ti_2Al_5 fazları yalnızca yüksek sıcaklıklarda stabil oldukları ve dar bir aralıkta homojenlik sergilemeleri nedeniyle alaşım geliştirmeye uygun görülmemektedir [11].



Şekil 2.2: Ti-Al sisteminin denge-faz diyagramı [12].

2.2.1 Ti_3Al

Ti_3Al hekzagonal kafes yapısı ile $P6_3/mmc$ uzay grubu düzeninde kristalleşmektedir (Strukturbericht DO_{19}). Bu yapı, kafes içerisinde Ti atomlarının Al atomlarının yerini alması sonucu oluşan sıkı paket hekzagonal A3 kafes yapısının üst düzenli örgüsü (superlattice)’dür. Yapıdaki atomik kompozisyonun %22 – 35 Al olduğu aralıkta kararlı durumdadır. Ayrıca Al kompozisyonu %31 civarında olduğunda 1210 °C’ye kadar da denge durumunu korumaktadır. Kompozisyona bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda kübik β -Ti ya da hekzagonal α -Ti’ye dönüşmektedir. Ti_3Al ’nin yoğunluğu 4.2 g/cm^3 ’tür ve Ti_3Al bazlı alaşımların yoğunluğu $4.1 - 4.7 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir.

Nispeten düşük yoğunluğu nedeniyle Ti_3Al bazlı alaşımlar malzeme uygulamaları için geliştirilen ilk intermetalik alaşımlardan biridir. Gevrek karakterde olması, sünek-gevrek geçiş sıcaklığının $600\text{ }^{\circ}C$ olması ve yüzeyinde koruyucu Al_2O_3 tabakasının oluşmaması sonucu düşük oksidasyon direnci sergilemesi nedeniyle Ti_3Al 'nin alaşımlanması büyük önem taşımaktadır [11].

2.2.2 TiAl

TiAl, Şekil x'e göre (faz diyagram) TiAl fazı geniş bir homojenlik aralığına sahiptir (sıcaklığa göre %45-61 aralığında). Bu faz temelde Ti ve Al atom katmanlarının istiflenmesi sonucu yüzey merkezli kübik (YMK) yapının tetragonal olarak çarpılmış halidir, tetragonal kafes yapısındadır ($P4/mmm$, $L1_0$). Bu düzenli yapı ergime sıcaklığı olan $1460\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar stabil durumdadır. Ti_3Al 'e kıyasla daha düşük yoğunluğu ($3.7\text{-}3.9\text{ g/cm}^3$) ve daha iyi oksidasyon direnci nedeniyle malzeme geliştirme konusunda en çok ilgi çeken fazdır. Bu nedenle benzer alaşımlar üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. TiAl ve Ti_3Al fazlarının konvansiyonel titanyum alaşımları ve süperalaşımlar ile karşılaştırılması Çizelge 2.4'de verilmiştir.

TiAl'in bu kadar çok ilgi çekmesine neden olan özellikleri; düşük yoğunluğu, oksidasyona karşı daha yüksek direnci ve yüksek Al oranı ile yüksek aktivasyon enerjisi nedeniyle – gaz türbin uygulamalarında kritik önem taşıyan – yanma özelliğidir. Dahası, difüzyonun hız kontrollü gerçekleştiği yüksek sıcaklıklarda, sahip olduğu sürünme dayanımı ve mukavemeti koruyabilme özelliği de bu fazın tercih edilme nedenlerindendir. Ayrıca büyük bir sıcaklık aralığında yüksek rijitliğe sahiptir. Öte yandan TiAl'in yapısından kaynaklanan güçlü kimyasal bağlar, gevrek karakterde yapı sergilemesine neden olmaktadır. Bu nedenle tokluğun iyileştirilmesi istenen uygulamalarda mikroyapının inceltilmesi ya da alaşımlandırma yapılması gerekmektedir.

İki fazlı alaşımlar ($TiAl + Ti_3Al$) göz önüne alındığında mekanik özellikler büyük ölçüde değişiklik göstermektedir. İki ana yapıda alaşım bulunmaktadır; yüksek sıcaklıkta tek faz α -Ti alaşımından elde edilen tam katmanlı yapı ve iki fazlı α -Ti + TiAl alaşımının soğutulması sırasında ortaya çıkan TiAl ve Ti_3Al plakaların üst üste katmanlı olarak istiflendiği dupleks yapılar [11].

Çizelge 2.4: Ti₃Al ve TiAl bazlı alaşımların titanyum alaşımları ve nikel bazlı super alaşımlar ile karşılaştırılması [11].

Özellikler	Ti-Bazlı	Ti ₃ Al-Bazlı	TiAl-Bazlı	Süperalaşımlar
Kristal Yapı	A3/A2	D019/A2/B2	L10/D019	A1/L12
Yoğunluk	4.5	4.1-4.1	3.7-3.9	7.9-9.1
Elastisite Modülü (GPa)	95-115	100-145	160-180	195-220
Akma Dayanımı (MPa)	380-1150	700-900	400-650	250-1310
Çekme Dayanımı (MPa)	480-1200	800-1140	450-800	620-1620
Sürünme Limiti (oC)	600	760	1000	1090
Oksidasyon Limiti (oC)	600	650	900	1090
Oda Sıcaklığında Süneklik (%)	10-25	2-26	1-4	3-50
Yüksek Sıcaklıkta Süneklik (%)	12-50	10-20	10-60	8-125
Kırılma Tokluğu K _{IC} (Mpa)	Yüksek	13-42	10-20	25

2.2.3 TiAl₃

TiAl₃'ün tetraginal yapısı (I4/mmm, D0₂₂), sıkı paket kübik L1₂ yapısındaki birim hücrelerin periyodik antifaz sınırları ile istiflenmesi sonucu elde edilmektedir. Bu nedenle bu yapıya tetragonal olarak çarpılmış, uzun periyotlu düzende kübik yapı da denilmektedir. Faz diyagramına göre ikili faz %1 Al aralığı ile sınırlı katı çözünürlüğe sahiptir ve 1387 °C'de düzensiz bir şekilde ergimektedir.

Diğer Ti-Al bileşiklerine kıyasla daha düşük yoğunluğa (3.3 g/cm³) ve daha iyi oksidasyon direncine sahiptir. Ancak mukavemeti diğer fazlardan daha düşüktür ve aşırı gevrek karakterdedir. Bu özellikleri iyileştirmek amacıyla TiAl₃'ün Hf, Zr, B ve Li elementleri ile mikroalaşımlanması denenmiştir ancak diğer fazlar üzerine yapılan çalışmalara kıyasla bu faz baz alınarak yapılan malzeme geliştirme çalışmaları sayıca oldukça azdır. Zayıf mekanik özellikleri nedeniyle TiAl₃, titanyum ve titanyum alaşımları yüzeyine yapılan koruyucu kaplamalara alternatif olarak önerilmektedir. TiAl₃'ün katı çözünürlük aralığı özel üçüncü elementin yapıya eklenmesi ile iyileştirilebilmektedir. TiAl₃ iğeri D0₂₂ bileşikler – örneğin NbAl₃ – ile tamamen karışabilmektedir [11].

2.2.4 TiAl₂

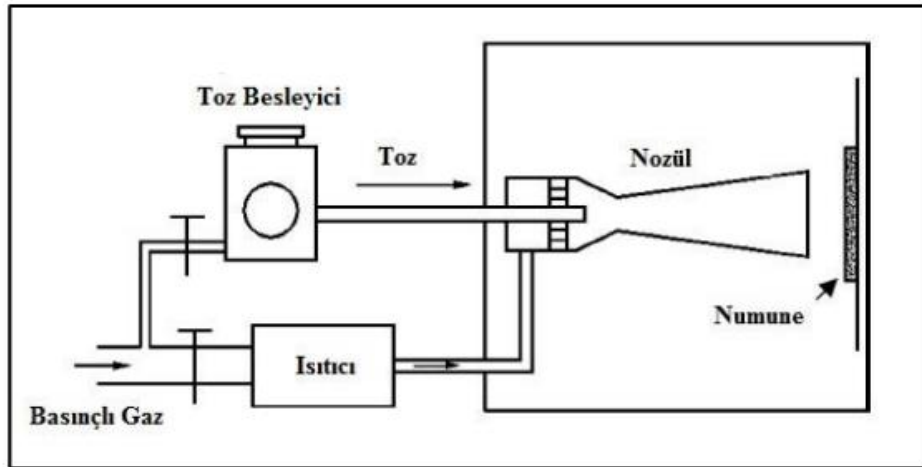
TiAl₂, hücre aralarında Ti₅₀Al₅₀ düzlemleri bulunduran, L1₂ hücrelerinden oluşan tetragonal (I4₁/amd, r-TiAl₂) yapıdadır. Diyagramdan da görüldüğü üzere homojen olduğu aralık %3 Al'dir. Tetragonal yapı 1214 °C'ye kadar kararlılığını korumakta, bu değerin üzerindeki sıcaklıklarda, 1433 °C'de düzensiz ergiyen ortorombik h-TiAl₂ yapısına dönüşmektedir.

Bu fazın mekanik özellikleri detaylı şekilde henüz incelenmemiştir. Buna neden olarak TiAl₂ fazının üçüncü bir element ile kısıtlı katı çözünürlük göstermesi verilebilir [11].

3. SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ (SGDP)

3.1 SGDP Tanımı ve Tarihçesi

Soğuk gaz dinamik püskürtme (SGDP) yöntemi bir kaplama tekniği olarak 1980'lerin ortalarında Novosibirsk'deki Rusya Bilim Akademisi Sibirya Bölgesi Teorik ve Uygulamalı Mekanik Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir. Rus bilim insanları bu yöntemi kullanarak bir çok saf metalin, metal alaşımların, polimer ve kompozitlerin çeşitli altlık malzemelere kaplanmasını başarı ile gerçekleştirmişlerdir. Genel bir SGDP sistemine ait şematik görünüm Şekil 3.1'de verilmiştir [13].



Şekil 3.1: Genel bir SGDP sistemi [13].

SGDP yönteminin geleneksel termal püskürtme yöntemlerinden en temel farkı, kaplamanın toz partiküllerinin yüzeye çarpmadan önce yarı-ergiyik hale getirilmeden oluşturulmasıdır. Geleneksel termal püskürtme sistemleri, ısınmış malzemenin kolay şekilde deforme olarak kaplama oluşturmasından dolayı, kaplama yapılacak tozun yüzeye çarptırılmasından önce kısmen ergitilmesi için yoğun bir ısı kaynağı kullanmaktadır. SGDP işlemi ise ısı kaynağı yerine yüksek basınçlı gaz (He, Ar, N veya sıkıştırılmış hava) kullanımıyla tozların (1-50 μm) hızlandırılarak bir nozül (Laval Nozülü) aracılığıyla süpersonik hızlarda (500-1000 m/s) malzeme yüzeyine çarptırılması prensibine dayanmaktadır. Partiküllerin çarpma anında plastik deformasyon oluşumuna yetecek seviyede kinetik enerjiye ulaşması sonucu kaplamanın oda sıcaklığının çok üstünde olmayan sıcaklıklarda, ergime ve

dolayısıyla difüzyon olmaksızın, katı halde gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Oluşan kaplamalar düşük poroziteli, düşük oksit içerikli ve homojen bir yapıya sahiptir [1,14]

SGDP işleminde, püskürtme sırasında oksidasyon ve diğer kimyasal reaksiyonların gerçekleşmemesi nedeniyle Ti, Cu vb. sıcaklıkla oksijene duyarlı kaplama malzemeleri önemli bir bozulma olmadan kullanılabilir. Termal püskürtme prosesine uygun olmayan nanofaz, intermetalik ve amorf malzemeler altlığa zarar vermeden kaplama olarak uygulanabilir. Kaplamalar, tane büyümesi ve gevrekliğe neden olan faz dönüşümleri gerçekleşmeksizin elde edilebilir. Ayrıca yüksek hızlarda yüzeye çarptırılan partiküller, bilyalama etkisi göstererek altlık malzemesi yararına basma kalıntı gerilmelerinde artış sağlamaktadır. SGDP teknolojisi; bakır, lehim, polimerik kaplamalar gibi malzemelere elektro-kaplama, lehimleme ve boyama gibi yöntemlere kıyasla daha uygun maliyetli ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır [13].

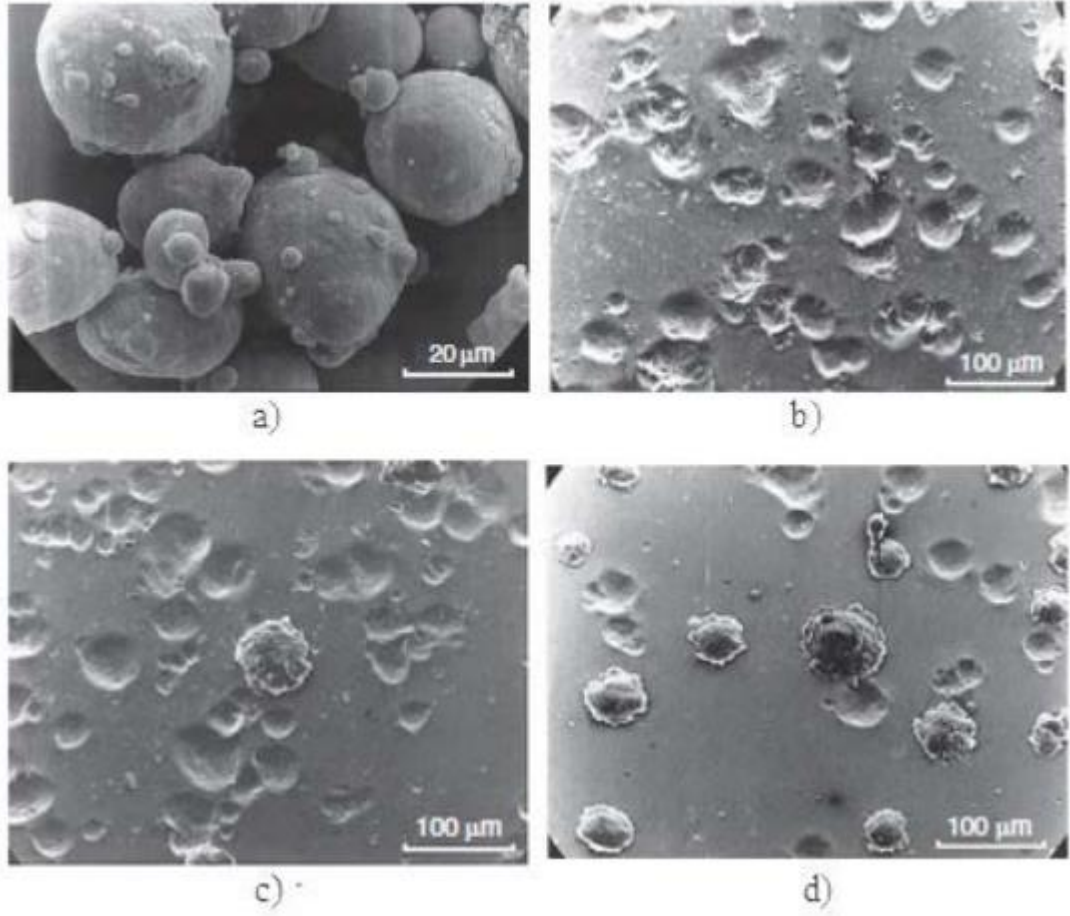
SGDP yöntemiyle oluşturulan kaplamaların en temel kusurlarından olan porozite ve yüzey pürüzlülüğü, lazer tekrar-ergitme gibi kaplama sonrası yüzey iyileştirme uygulamaları ile giderilebilir. Lazer yüzey ergitme prosesi, püskürtme kaplamaların aşınma, korozyon ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda gelecek vaadeden bir uygulama olarak görülmektedir [1].

3.2 İşlem Parametreleri

SGDP prosesinde püskürtülen tozların altlığa bağlanmasına; temas yüzey alanı ve krater derinlik-genişliği gibi geometrik parametreler ile plastik şekil değiştirme kabiliyeti, akma dayanımı, basınç ve sıcaklık gibi termo mekanik değişkenler etki etmektedir. Bu parametreler tozların yüzeye çarpma hızı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, kritik çarpma hızına yakın bir hızla yüzeye çarpan partiküllerin, diğer değişkenler için de kritik değere ulaştığı kabul edilmelidir.

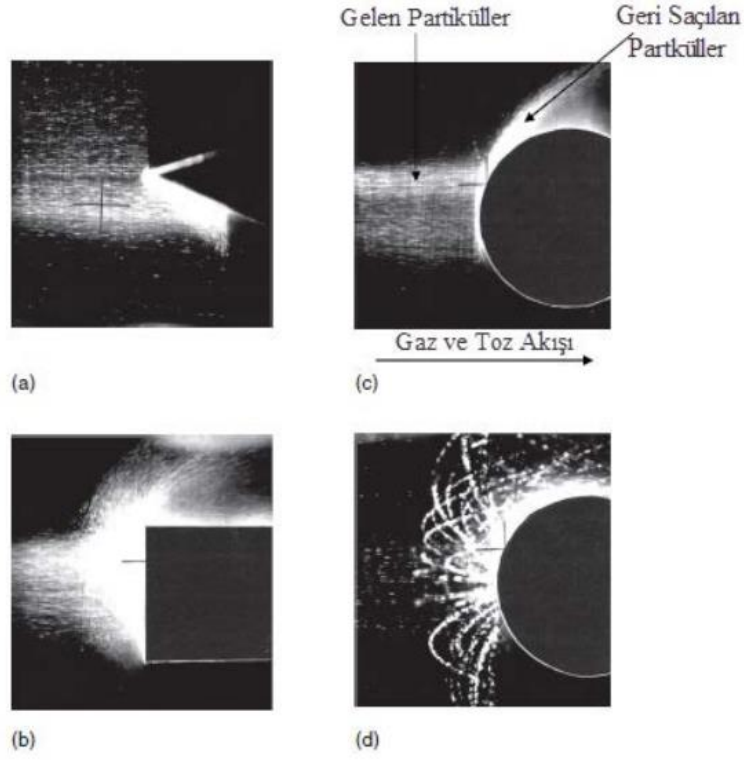
Parçacık hızının düşük olması durumunda partiküller yüzeye çarptığında tutunamadığından ve yüzeyden sekerek geri saçılırlar. Bu durum, bağlanma olmadığından, altlık yüzeyinde erozyona neden olur (Şekil 3.2b). Kaplama, ancak parçacık hızının kritik değere ulaştığı ya da bu hızı aştığı durumlarda oluşabilir (Şekil 3.2c. ve Şekil 3.2d). Yapılan deneyler sonucunda kritik

partikül hızının, kullanılan toz ve kaplanacak malzemenin cinsine, partikül sıcaklığı ile boyutuna ve kaplama yapılacak yüzeyin durumuna bağlı olduğu saptanmıştır [15].



Şekil 3.2: (a) Al partikülleri (b) 730 m/s (c) 780 m/s (d) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partiküllerinin etkisi [15].

Püskürtülen tozlar, gelme açılarıyla aynı ya da bu değere yakın bir açıyla yüzeyden geri saçıldıkları durumlarda, devam etmekte olan püskürtme prosesi nedeniyle arkadan gelen akış yoğunluğuna kapılarak tekrar geri döner ve altlığa tekrar çarparlar. Bu süreç tekrarlanarak devam ettiği takdirde, saçılan partiküllerin geri dönüş mesafeleri zamanla azalacağından yüzeyde birikme görülür. Püskürtülen tozlar ile seken partiküller arası etkileşim sonucu yoğunluğu giderek artan bir tabaka oluşur. Bu durum Şekil 3.3’den görülebilmektedir.



Şekil 3.3: Lazer saçılma metoduyla çekilen toz yörünge fotoğrafları. Silindir ve küre gövde çapı yaklaşık 8mm (a) kama yarığı ve Al parçacıkları (b) silindir ve Al parçacıkları (c) küre ve Al parçacıkları (d) küre ve akrilik cam parçacıkları [15]

4. LAZER YÜZEY MODİFİKASYONU

4.1 Lazer ve Lazer Işıklarının Malzemeler ile Etkileşimi

Lazer (light amplification by stimulated emission of radiation), morötesi (ultraviyole) ile kızılötesi (infrared) aralığında dalgaboyuna sahip koherent, yakınsak ve monokromatik bir elektromanyetik radyasyon ışınıdır. Lazer aracılığıyla her türlü madde içerisinde herhangi bir yüzeye, hassas spot genişliği/boyutu ve etkileşim/darbe süresi (10^{-3} – 10^{-5}) ile çok düşük ($\sim$ mW) ya da aşırı yüksek (1-100 kW) değerlerde güç odaklanabilmektedir. Piyasada mevcut olan lazerler ve temel uygulamaları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Lazerin böylesi geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlayan özellikleri; uzaysal ve geçici bağdaşım (eşsiz faz ve genlik), düşük ıraksaklık (optik eksene paralel), darbeli ya da sürekli yüksek güç yoğunluğu ve monokromatiklik olmasıdır [16].

Çizelge 4.1: Mevcut lazer prosesleri ve temel uygulamaları [16].

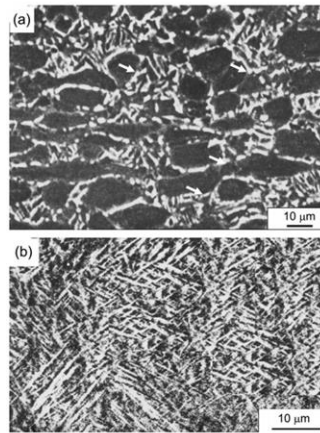
Kaplama Tekniği	Kaplama Kalınlığı	Kaplama Malzemeleri	Lazer Türleri
Lazer Kaplama	50 μ m-2mm	Metalik alaşımlar, seramikler	CO ₂ , Nd:Yag, HPDL
Lazer Ergitme/Partikül Enjeksiyonu	Birkaç yüz μ m-2mm	Metal matrisli kompozitler	CO ₂ , Nd:Yag, HPDL
Lazer Yüzey Ergitme	Kaplamanın bir kısmı ya da tamamı	Metal alaşımları, metal matrisli kompozitler, seramikler	CO ₂ , Nd:Yag, HPDL
Lazer Destekli Termal Püskürtme	50 μ m-2mm	Metal alaşımları, metal matrisli kompozitler, seramikler	CO ₂ , Nd:Yag, HPDL
Darbeli Lazer Kaplama	Birkaç μ m	Metalik alaşımlar, seramikler	Eksimer lazer
Lazer Destekli Kimyasal Buhar Kaplama	Birkaç μ m- birkaç yüz μ m	Metalik alaşımlar	CO ₂ , Nd:Yag, HPDL

Çizelge 4.1 (devam): Mevcut lazer prosesleri ve temel uygulamaları [16].

Kaplama Tekniği	Kaplama Kalınlığı	Kaplama Malzemeleri	Lazer Türleri
Lazer Yüzey Alaşımlama	Birkaç μm	Metalik alaşımlar	Eksimer, CO ₂ , Nd:Yag, HPDL

Lazer ile malzeme işleme sırasında, lazer ışınının yukarıda belirtilmiş olan karakteristik özelliklerinin tamamından faydalanılmaktadır.

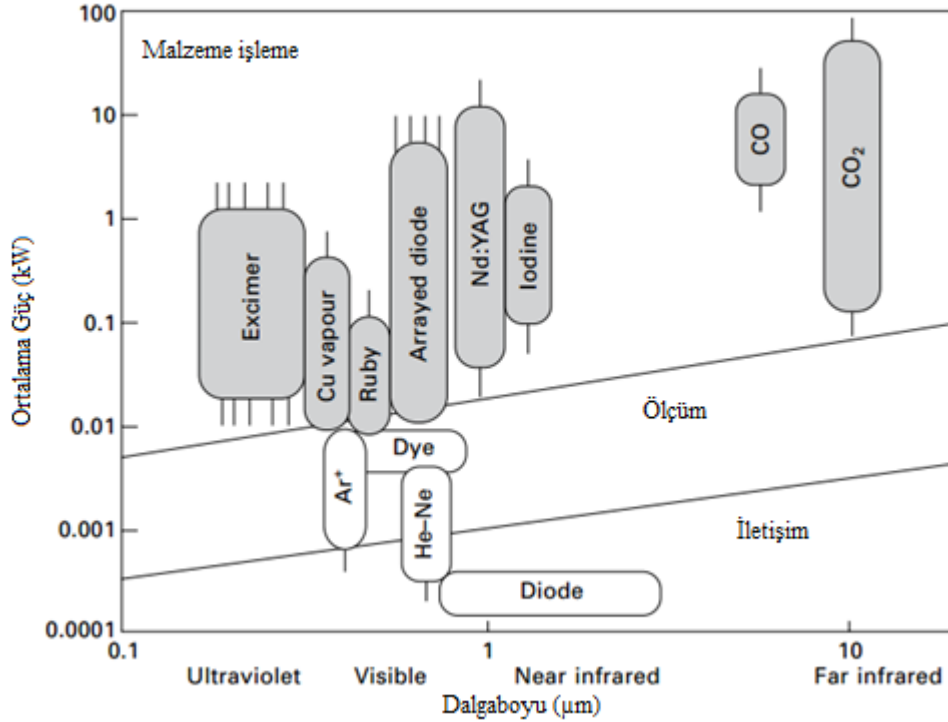
Lazer ışınları opak bir yüzeye çarptığında, sahip olduğu radyasyonun bir kısmı yansırken kalanı malzemenin alt katmanlarına absorbe olur. Bu absorpsiyon işlemi, ışının dalga boyuna, sıcaklığa ve malzemenin doğasına bağlıdır. Kısa dalga boyları, yüksek sıcaklık ve daha pürüzlü yüzey metalik malzemeler için daha yüksek soğurabilirlik sağlamaktadır. Soğurulan lazer enerjisi metallerde serbest elektronların uyarılmasına, yalıtkan malzemelerde titreşimlere ve yarı-iletken malzemelerde her iki durumun ortaya çıkmasına neden olur. Bu uyarım enerjisi hızla ısıya dönüşür ve ardından ısının malzemeye iletimi, yüzeyden ışıma gibi bir takım ısı transferi prosesleri gerçekleşir. Malzeme içerisindeki ısı dağılımı, yüzeyde ısı oluşumu ve bu ısının malzeme içine iletimi aracılığı ile sağlanmaktadır. Malzemenin termofiziksel özelliklerine ve lazer parametrelerine bağlı olarak; yüzeyde ince bir tabakanın ısıtılması, ergitilmesi, hatta buharlaştırılması sağlanabilmektedir ve hemen ardından hızlı katılaşma aracılığı ile mikroyapının inceltilebilmesi ya da homojenizasyonu gerçekleştirilebilmektedir [16]. Şekil 4.1’de lazer yüzey ergitme uygulamasına örnek olarak Ti-6Al-4V alaşımının işlem görmemiş ve yüzey ergitilmiş yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.1: (a) işlem görmemiş, (b) lazer yüzey ergitilmiş (600W güç, 6 mm/s tarama hızı ve 5 l/min gaz akış hızı) Ti-6Al-4V taramalı elektron fotoğrafları verilmiştir [7].

Malzeme uygulamaları için pek çok lazer türü kullanılmıştır ancak bunların yalnız dört tanesi yüzey işlemlerinde etkili olarak kullanılabilecek dayanıklılığı ve yeterli enerjiyi sağlayabilmektedir: CO₂ lazer (10.6 μ m dalgaboylu), Nd:YAG lazer (10.6 μ m), yüksek güçlü diyor lazer (800-950 nm) ve eksimer lazer (Kripton florür lazer için 248 nm). CO₂, Nd:YAG ve yüksek güçlü diyor lazer ile sürekli ışın kullanılarak yapılan yüzey işlemleri, söz konusu lazerlerin uzun dalgaboyları nedeniyle ısı etkisi aracılığı ile gerçekleşmekte olup 50 μ m – 2 mm aralığında ergime derinliği sağlamaktadırlar [16].

Farklı lazer türleri aktif madde (katı, sıvı, gaz), dalgaboyu, güç, enerji ve çalışma şekline (sürekli, darbeli) göre gruplandırılmaktadır. Mevcut lazer proseslerinin ortalama güç ve dalgaboylarına göre sınıflandırılması Şekil 4.2’de verilmiştir [17].



Şekil 4.2: Piyasadaki lazer proseslerinin uygulama alanları üzerine ortalama güç ve dalgaboylarına göre sınıflandırılması [17].

4.2 Lazer Uygulamalı Kaplamalar

Günümüzde uygulanmakta olan çok sayıda lazer uygulamalı kaplama tekniği bulunmaktadır. Lazer kaplama (laser cladding) ve lazer ergitme/partikül enjeksiyonu (laser melting/particle injection) teknikleri genellikle altlığın en az derecede ergimesini sağlayarak kalın kaplamalar elde edilmesinde kullanılmaktadır. Lazer

yüzey tekrar-ergitme (laser surface remelting), geleneksel yöntemlerle elde edilmiş kaplamaların mikroyapılarını modifiye etmek ve özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapı hatalarının ortadan kaldırılması için uygulanmaktadır. Lazer destekli termal püskürtme (laser-assisted thermal spraying), diğer bir adıyla lazer hibrid püskürtme yöntemi ise termal püskürtme ile yüksek enerjili lazerin birleştirilmesi aracılığıyla normal termal püskürtme yönteminden çok daha yüksek işleme verimine sahip, yoğun ve altlığa daha iyi tutunabilen kaplamaların oluşturulmasını sağlamaktadır. Darbeli lazer kaplama (pulsed laser deposition) ve lazer destekli kimyasal buharlı kaplama (laser-assisted chemical vapor deposition), ince filmlerin oluşturulması amacıyla kullanılmaktadır. Öte yandan lazer yüzey alaşımlamada (laser surface alloying) ise altlığın kaplama malzemesi veya bir gaz bileşeni ile ergitilmesi ve karıştırılması aracılığıyla yüzey kimyasının ve bileşiminin değiştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntem ile kalın kaplamalar ya da ince film tabakaları elde edilebilmektedir [16].

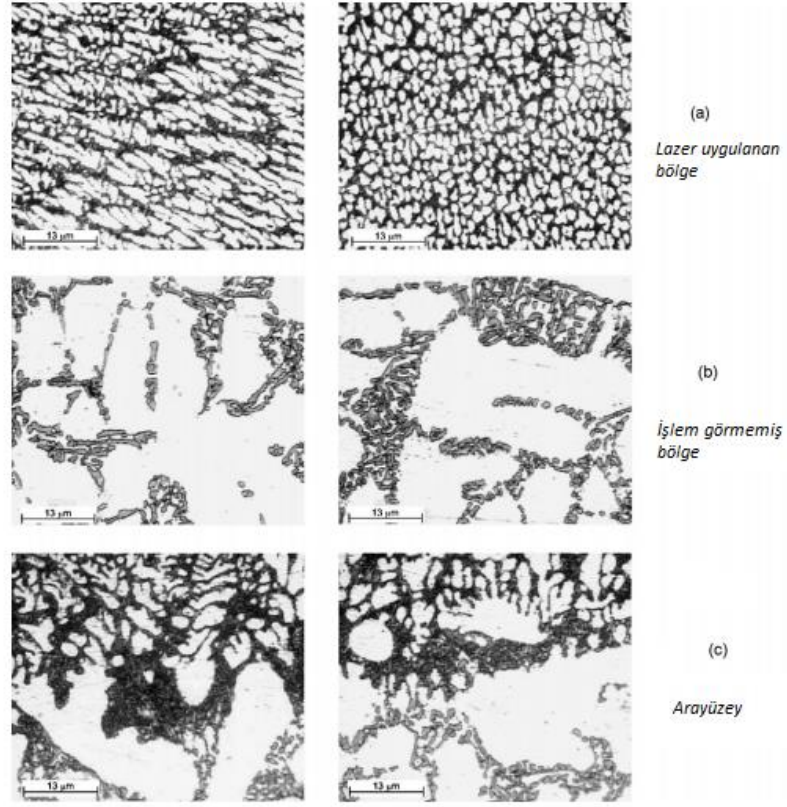
4.3 Lazer Yüzey Ergitme

Lazer yüzey modifikasyonu yöntemlerinden biri olan lazer yüzey ergitme işleminde, yüksek enerjili lazer ışıını ile yüzeyin ince bir katmanı hızla ergitilir ve ardından hızla katılaşma gerçekleşmesiyle ana malzemeden farklı bir mikroyapıda yüzey elde edilir. Ergiyik yüzey katmanının yüksek soğuma hızı yüzeyde amorf bir yapının, metastabil fazların ya da ince taneli bir yapının oluşmasını sağlayarak aşınma, korozyon ve yorulma dayanımı gibi özelliklerin iyileştirilmesini sağlayabilmektedir. Lazer yüzey ergitmenin sağladığı en önemli avantaj, diğer yüzey modifikasyon işlemlerinden farklı olarak yüzey bileşimini bozmaksızın mikroyapıyı değiştirebilmesidir [16].

Lazer ile ergitilmiş katmanın yeniden katılaşması sırasında soğuk olan altlık sürekli olarak ergiyik ile temas halindedir ve adeta sonsuz bir ısı soğurucu işlevi görmektedir. Ergiyik ve altlık arasında bulunan yüksek sıcaklık gradyanı, kendiliğinden su verme etkisi oluşturarak ince taneli mikroyapı ve genişletilmiş katı çözeltilerin oluşumuna yol açmaktadır. Ayrıca kaplama-altlık ara yüzeyinde metalürjik bağların oluşumunun sağlanmasıyla altlığa daha iyi tutunan bir kaplama elde edilmektedir [18].

Lazer yüzey ergitme prosesinden, farklı kaplama uygulamalarından sonra da faydalanılabilmektedir. En yaygın karşılaşılan örnek; termal püskürtme yapılmış

kaplamaların lazer ile ergitilmesidir. Bu uygulama ayrıca “Lazer Tekrar-Ergitme (Remelting)” olarak da adlandırılmaktadır [16]. Al-9 wt%Si alaşımının lazer tekrar-ergitilmesi sonucu, yüzeyde farklı bölgelerde görülen mikroyapıları Şekil 4.3’de verilmektedir [19].



Şekil 4.3: Al-9 wt%Si alaşımının kesit görüntüleri: (a) lazer tekrar-ergitilmiş, (b) altlık ve işlenmemiş numune, (c) işlenmemiş bölge ile lazer tekrar-ergitilmiş bölge arayüzeyi [19].

Metalik malzemelerin yüksek sıcaklık korozyon dayanımı amacıyla uygulanabilecek lazer işlemleri oldukça geniş çaplı olmasına karşın, ancak üç temel yaklaşım olasıdır. Bunlar; lazer yüzey ergitme, lazer alaşımlama ve lazer kaplamalardır [18].

Lazer yüzey ergitme ile ergiyik bölgedeki elemental dağılımın değiştirilebilmesi de gerçekleştirilebilmektedir. Fakat bu uygulamanın asıl amacı yüzey tabakasındaki mikroyapının modifiye edilmesidir. Oluşan yeni yüzey yapısı, bazı durumlarda

korozyon ürünlerinin çekirdeklenmesi ve büyümesini etkileyerek oksit tabakalarının yüzeye tutunmasını da iyileştirebilmektedir. Ayrıca, lazer yüzey ergitme işleminin plazma-püskürtme kaplamalarında uygulanmasıyla kaplama porozitesinin ve kimyasal homojensizliklerin azaltılması da sağlanmıştır [18].

4.3.1 İşlem parametreleri

İşlem sırasında kontrol edilebilen ana parametreler; lazer enerjisi (q), ışın yarıçapı (r_b), numune hızı (v), ve ışın modu (sabit, dönel, silindir şapka ya da Gaussian)'dur. Bunlara ek olarak alaşımlama söz konusu ise alaşımın bileşimi ve derişimi; işlem azot vb. bir gaz içeriyorsa derişim ve akım hızı gösterilebilir. Diğer önemli parametreler ise numune boyutları ve malzemenin lazer enerjisini soğurabilme kapasitesidir [17].

4.3.2 Lazer yüzey ergitmenin avantajları

Günümüze kadar malzemelerin korozyon, yüksek sıcaklık oksidasyonu, aşınma, erozyon vb. yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çok sayıda lazer yüzey işleme tekniği geliştirilmiştir. Lazer ile malzemeler arası etkileşimin oldukça sınırlı olması onu mühendislik malzeme kaplamaları konusunda daha da çok çekici kılmaktadır. Lazer uygulamasının avantajları [16,18]:

- Isı tesiri altındaki bölge oldukça küçük olduğundan çarpılmanın en aza indirgenmesi,
- Hızlı soğuma etkisiyle denge dışı ve ince bir mikroyapı oluşumu,
- Lazer uygulamalarının işleme hızının yüksek ve otomasyonunun kolay olması,
- Kaplama/alaşım ile altlık arasında mükemmel bir metalürjik bağ oluşması,
- Poroz olmayan yoğun bir yüzey tabakası elde edilebilmesi,
- Uygulama yapılacak parçanın şekli konusunda temel bir kısıtlama olmaması
- Hiçbir temel kaplama ve yüzey işlemi ile elde edilemeyecek yüzey mikroyapıları sağlaması,
- Parça yüzeyindeki sınırlandırılmış bölgelerin, çevresindeki kısımlara etki etmeksizin işlenebilmesi

olarak verilmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada saf titanyum malzeme yüzeyinde soğuk gaz dinamik püskürtme (SGDP) yöntemi ile oluşturulan alüminyum ve titanyum-alüminyum kaplamaların, ısıtıl işlem ve lazer yüzey ertitme işlemleri aracılığıyla intermetalik dönüşüm geçirmesi sağlanarak elde edilen titanyum-alüminyum intermetalik tabakalarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada altlık malzemesi olarak ikinci kalite ticari saflıkta titanyum (Cp-Ti, Grade-2), kaplama malzemesi olarak ise %99,99 saflıkta Titanyum ve Alüminyum tozları kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında;

- Kaplama oluşturma işlemleri;
 - Soğuk gaz dinamik püskürtme
 - Isıl işlem,
 - Lazer uygulaması,
- Karakterizasyon işlemleri;
 - Metalografik numune hazırlanması,
 - Mikroyapı analizi,
 - Yüzey ve kesit sertlik ölçümleri (HV),
 - Aşınma deneyleri,

olmak üzere iki ana başlıkta gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin makro görüntüleri Şekil 5.1’de, uygulanan işlemlere göre numunelerin sınıflandırılması ise Çizelge 5.1 verilmiştir. Ancak bu numunelerden 1 no’lu olanında SGDP ile kaplama yapılmasının ardından kaplamalarda atma görülmesi ve 6 no’lu numunede ise ısıtıl işlem sonrası yapılan lazer uygulaması sonrası yüzeyde yoğun çatlamlar oluşması ve bu çatlak bölgelerinde kaplamanın altlıktan koparak ayrılması sonucu bu numuneler deneysel çalışmaların ilerleyen aşamalarında kullanılamamıştır.



Şekil 5.1: Numunelerin makro görüntüleri. (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3 (d) Numune 4 (e) Numune 5 (f) Numune 6

Çizelge 5.1: Deneysel çalışmalar dahilinde hazırlanan numuneler.

Numune Numarası	Kaplama	Isıl İşlem Uygulaması	Lazer Uygulaması
1	%100 Al	-	77W, 5Hz, 100mm/s, 6 paso
2	%100 Al	750°C, 24 Saat	-
3	%100 Al	750°C, 24 Saat	77W, 5Hz, 100mm/s, 6 paso
4	%60+%40 Ti-Al	-	77W, 5Hz, 100mm/s, 6 paso
5	%60+%40 Ti-Al	750°C, 24 Saat	-
6	%60+%40 Ti-Al	750°C, 24 Saat	77W, 5Hz, 100mm/s, 6 paso

5.1 Kaplama Oluşturma İşlemleri

5.1.1 Soğuk gaz dinamik püskürtme

12mm çapındaki saf titanyum çubuktan 3 mm kalınlığında disk şeklinde numuneler kesilmiştir. Kaplanacak yüzeyler 120'lik zımpara ile düzeltilerek alkol ile temizlenmiştir. Proses gereği yüzeyde bir miktar pürüzlülük istendiği için kaba zımparalama işlemi yeterli görülmüştür.

Hazırlanan altlıkların yarısına alüminyum, diğer yarısına ise titanyum-alüminyum olmak üzere iki farklı kaplama yapılmıştır. Alüminyum kaplama için %99,99 saflıkta alüminyum tozu kullanılmıştır. Titanyum-alüminyum kaplamalar için ise ağırlıkça %60 Ti %40 Al harman kullanılmıştır.

Kaplama yöntemi olarak seçilen SGDP sistemi; RUSONIC marka SGDP cihazı, kaplama odası, siklon, kompresör, basınçlı hava tüpü, kurutucu, püskürtme tabancası, nozül ve altlık kısımlarından oluşmaktadır.

Besleme tozları altlık üzerine manüel olarak püskürtülmüştür ve taşıyıcı gaz olarak 3 bar basınca sahip kurutulmuş hava kullanılmıştır. Nozülün püskürtme mesafesi 10

mm olarak belirlenmiş, kaplama hızı olarak 2,5 mm/s seçilerek ve 2 paso değerinde kaplamalar elde edilmiştir. Burada hızdan kasıt, nozülün altlık yüzeyinde gezinmesidir.

5.1.2 Isıl işlem

Isıl işlemler altlığın ve kaplamaların oksitlenmesini önlemek amacıyla 10^{-3} bar basınç ile vakum altında gerçekleştirilmiştir. Vakumlama işlemi EDWARDS marka RV3 model vakum pompası kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Her iki kaplamadan da numune alınarak ısınma oranı 20°C/dk olarak ayarlanmış PROTHERM marka PTF serisi 12/38/250 model tüp fırında 750°C sıcaklıkta 24 saat süreyle ısıl işleme tabi tutulmuştur. Bu sürenin ardından numuneler fırında soğumaya bırakılmıştır.

5.1.3 Lazer uygulaması

Lazer uygulaması maksimum gücü 140W olan sürekli CO₂ lazer ile gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel uygulamalar sonucunda tekrar ergimiş yüzeyin odaktan 454 mm uzaklıkta, 100 mm/sn hız, 5 kHz frekans ve %55 güç (77W) değerleri uygulandığında elde edildiği tespit edilmiştir.

Belirlenen parametreler doğrultusunda, numunelere eşit sürelerde (6 tur), 0,07 mm aralıkla 0°-90° tarama yapılarak sürekli CO₂ lazer uygulanmıştır.

5.2 Karakterizasyon İşlemleri

Karakterizasyon çalışmaları; metalografik inceleme için numune hazırlanması, mikroyapı analizleri, kesit sertlik ölçümleri, X-ışınları difraksiyonu ve aşınma testleri olarak 5 aşamada yapılmıştır.

5.2.1 Metalografik numune hazırlanması

Metalografik inceleme için numuneler kesitten incelenebilecek şekilde bakalite alındıktan sonra sırasıyla 120, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500'lük zımparalar ile düzeltilmiştir. Zımparalanan numunelerin parlatılması iki kademedede gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada MDmol kalite çuhada 3µm'luk elmas cila ve

yağlayıcı kullanılmış, sonrasında ise MDnap kalite çuhada silika ve yağlayıcı kullanılarak parlatma işlemi tamamlanmıştır.

5.2.2 Mikroyapı analizleri

Mikroskobik incelemeler için LEICA marka optik mikroskop ve HITACHI marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

5.2.3 Yüzey ve kesit sertlik ölçümleri (HV)

Kapmaların yüzey ve enine kesit sertlik değerleri BUEHLER TUKON 1102 marka mikro sertlik cihazı kullanılarak vickers cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri 10 gr yük altında 15 sn süreyle gerçekleştirilmiş ve her bir numune için en az 10 ölçüm yapılarak ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır.

Ayrıca kaplamaların gevreklikleri hakkında fikir edinmek için 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500 ve 1000 gr yükler ile yüzey bölgelerinden sertlik ölçümleri yapılmış ve iz çevresinde ilk çatlak oluşan yük belirlenmiştir.

5.2.4 X-Işınları difraksiyon analizleri (XRD)

XRD analizi, ince film tekniği ile analiz yapabilen GBC MMA 027 model difraktometre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numune yüzeylerinde oluşan fazların tespiti CuK_α radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. X-ışınları geliş açısı 1° 'dir ve 10° - 90° açıları arasında $0,02^\circ$ 'lik artışlarla numuneler taramıştır.

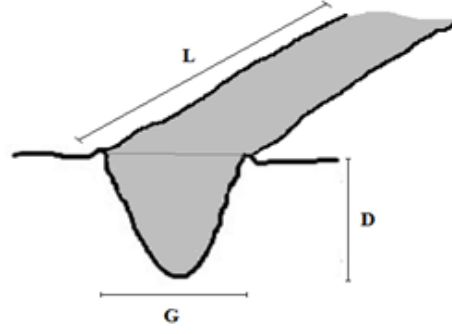
5.2.5 Aşınma deneyleri

Aşınma testleri TRIBOTECH marka salınlımlı aşınma cihazında, ileri-geri hareketli yükleme koşullarında yapılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında alümina top kullanılmıştır. Aşındırıcı top 1, 2 ve 3N yük altında 10 mm/s kayma hızında numune yüzeyine sürmüştür. Aşınma deneylerinde iz uzunluğu 5 mm ve toplam kayma mesafesi 50 m olarak ayarlanmıştır. Deneyler kuru ortamda ortalama %30 nem ve 25°C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı verileri bilgisayar aracılığı ile elde edilmiştir.

Aşınma yüzeyi ve aşındırıcı top deney öncesi aseton kullanılarak temizlenmiştir.

Deney sonucu numune yüzeyinde oluşan izler Veeco Dektak 6M tipi yüzey profilleri ölçme cihazı aracılığı ile ölçülmüş ve elde edilen aşınma iz hacimleri Şekil 5.1'de verilen yöntem ile hesaplanmıştır. Tüm izlerden 5 ölçüm alınmıştır.

Son olarak numunelerin ve aşındırıcı toprakların temas yüzeyleri mikroskopik olarak incelenmiştir.



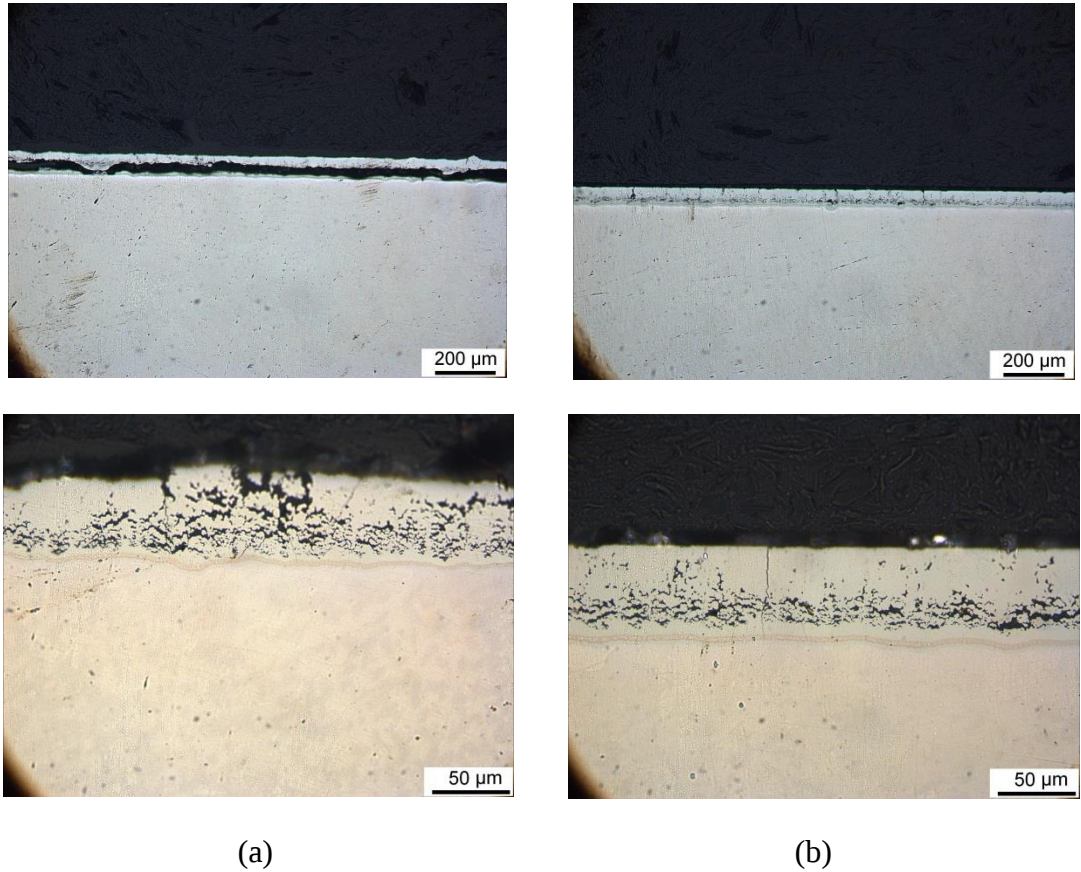
$$V = (\pi / 4) \cdot G \cdot D \cdot L$$

Şekil 5.2: Aşınma izi derinliği, genişliği ve alanın şematik olarak gösterimi (V: Aşınma izi hacmi, G: Aşınma izi genişliği, D: Aşınma izi derinliği, L: Aşınma izi uzunluğu)

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Mikroyapı İncelemeleri

Kesitten alınan farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.3’de verilmiştir. SGDP işlemi sonrası poroz ve pürüzlü bir yapıda kaplama elde edilmiştir. Al kaplı Numune 2’de, ısıl işlem sonrası, kaplamada yüksek miktarda porozite ve yer yer altlıktan ayrılmalar gözlenirken benzer aşamaları içeren Numune 3’de nispeten daha yoğun (düşük porozite) bir kaplama ve iyi bir arayüzey olduğu görülmektedir (Şekil 6.1a ve Şekil 6.1b). Ancak Numune 2’de karışlaşılmayan kesit boyunca çatlak oluşumu Numune 3’de görülmüştür. Bu durum, lazer uygulamasının Numune 3’deki kaplama mikroyapısını etkilediği şeklinde yorumlanmıştır.

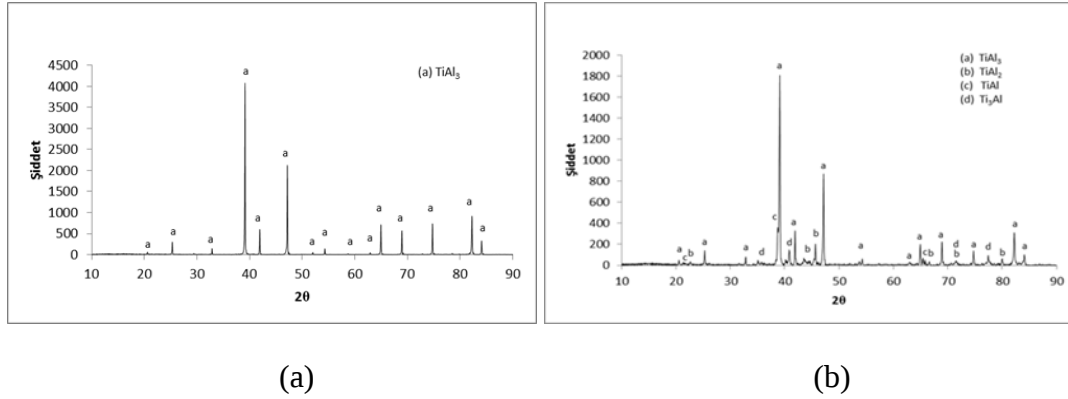


Şekil 6.1: (a) Numune 2 ve (b) Numune 3’e ait kesitten mikroyapı görüntüleri.

Şekil 6.2’de Al kaplı numunelerde, ısıtıl işlem ve lazer işlemleri sonrası uygulanan, XRD analizi ile yapıda görülen fazlar verilmiştir. Isıtıl işlem sırasında, kaplamadaki Al ile Ti altlık arasındaki difüzyon sonucu, numune yüzeyinde $TiAl_3$ fazı oluştuğu görülmektedir. XRD sonuçlarında saf Al piklerine rastlanmadığından, Ti_3Al fazının oluşumu sırasında yapıdaki Al’nin tamamen reaksiyona girdiği anlaşılmaktadır.

Literatürde Ti-Al intermetaliklerinin oluşumu üzerine yapılmış çalışmalarda $TiAl_3$ fazının, diğer intermetalik fazlardan daha önce oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca $TiAl_3$ dönüşümünün oldukça ekzotermik bir reaksiyon olması sonucu bölgesel aşırı ısınmalara yol açarak normalde daha yüksek sıcaklıklar gerektiren fazların oluşumuna yol açabildiği de belirtilmiştir [20]. Numune 3’e ait XRD analizinde (Şekil 6.2b) karşılaşılan zayıf şiddetli piklere sahip diğer Ti-Al fazlarının, lazer etkisi ile çıkılan yüksek sıcaklıklar ve bu ekzotermik reaksiyonlar sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

Numune 2 ve Numune 3’e ait XRD analiz sonuçları karşılaştırıldığında, görülen ana fazın aynı olmasına karşın, pik şiddetlerindeki farklılık görülmektedir.

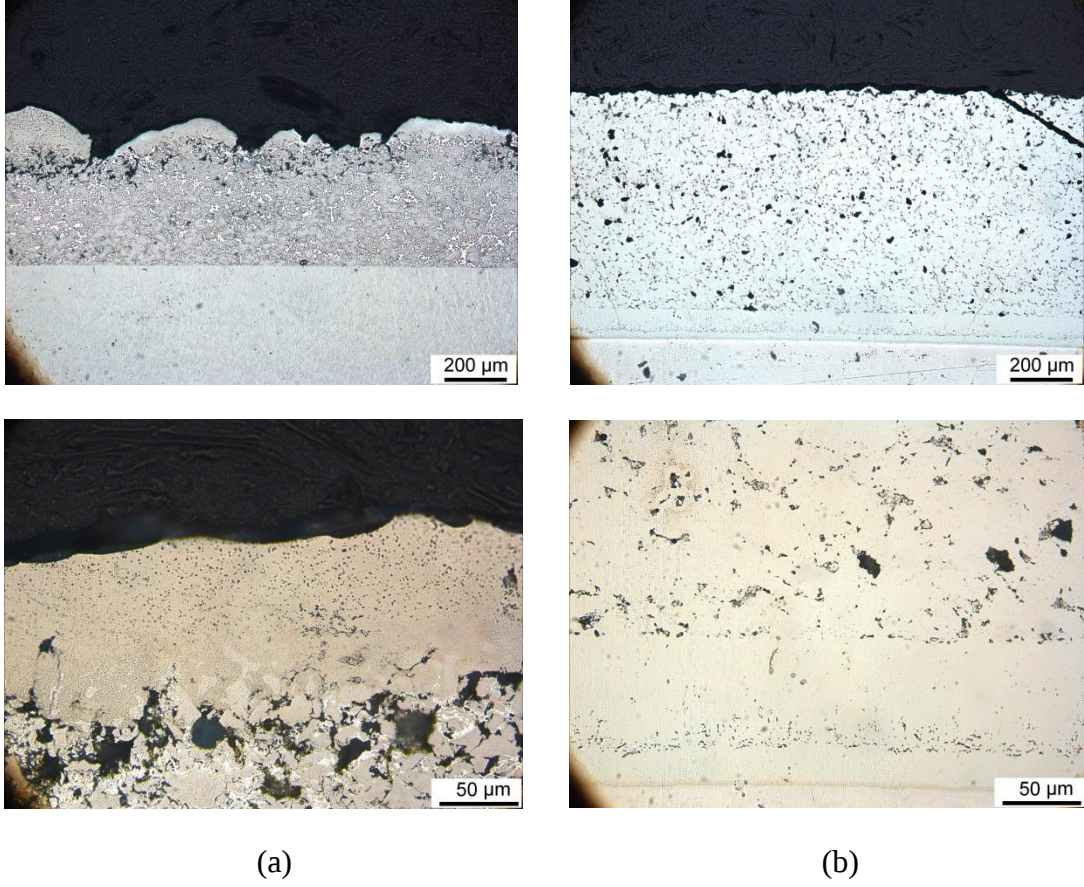


Şekil 6.2: (a) Numune 2 ve (b) Numune 3’e ait XRD grafikleri.

Ti-Al kaplanan numunelere ait kesit mikroyapı görüntülerine (Şekil 6.3) bakıldığında, Numune 5’de ısıtıl işlem sonrası poroz yapıda ve altlıkla bağı çok iyi kalitede olan bir yapı elde edilmiştir. Ara yüzeyde geniş bir difüzyon bölgesi oluşmuştur. Numune 5’e ait XRD grafiği (Şekil 6.4b), kaplamanın tümünün $TiAl_3$ fazına dönüştüğünü göstermektedir. Kaplamadaki Al’nin tamamı $TiAl_3$ oluşumunda reaksiyona girmiştir. Kaplama yapısındaki porozite “Kirkendall etkisi”nin sonucudur.

Kirkendall etkisi, katı faz difüzyonunda, atom difüzyonunun doğrudan atomlar arası yer değişimi sonucu değil atomlar ile boşluklar arası değişimden kaynaklandığını

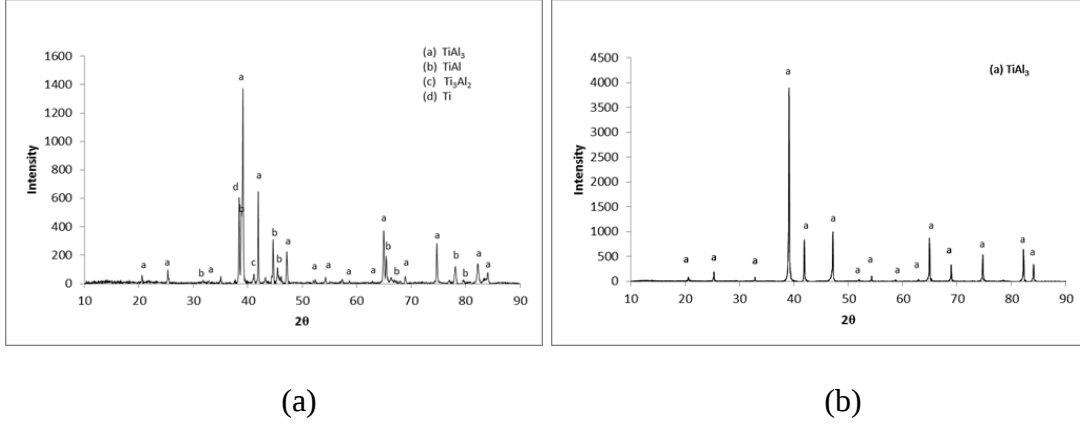
ortaya çıkarmıştır. Porozitenin oluşumu, farklı difüzyon katsayılarına sahip yayının çiftinde, daha hızlı olan difüzyon bileşeninde fazladan boşlukların oluşmasıyla gerçekleşmektedir [21].



Şekil 6.3: (a) Numune 4 ve (b) Numune 5'e ait kesitten mikroyapı görüntüleri.

Ti-Al dönüşümü sırasında porozite oluşumu da ısıtılma sırasında kirkendall etkisine uygun olarak Al'nin difüzyonu ile başlamaktadır. Titanyum atomları neredeyse sabit durumdayken Al atomları Ti kafesine difüze olduğu için Al atomlarındaki bu hareketin boşluk oluşumuyla dengelenmesi gerekmektedir. Sonuçta daha önceden Al atomlarının bulundukları bölgelerde büyük boşluklar oluşur ve sistemin serbest enerjisini düşürmek için yoğunlaşarak porların oluşumuna neden olurlar [22].

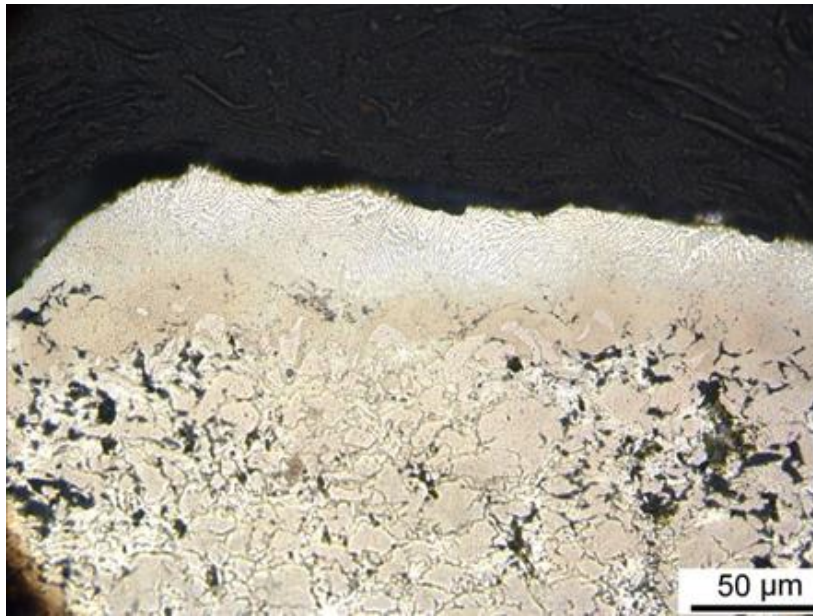
Numune 4'de ise doğrudan SGDP ile Ti-Al toz karışımı kaplanmış yüzeye lazer uygulanması sonucu süreksiz yapıda bir kaplama elde edilmiştir. Şekil 6.3a'dan da görüldüğü üzere, lazer uygulaması kaplamada altlığa kadar nüfuz edememiş, yalnız kaplamanın üst (yüzey) bölgesinde belirli bir kalınlığa etki edebilmiştir. Bu durumun, test numunelerinin sayısını artırılması ve farklı parametrelerin uygulanması ile parametrelerin optimizasyonu sağlanarak giderilmesi mümkündür.



Şekil 6.4: (a) Numune 4 ve (b) Numune 5'e ait XRD grafikleri.

Lazer ergitilmiş bölgeye bakıldığında yapının yüzeye yakın kısımlarında porozitenin çok küçük boyutlarda olduğu, daha iç kısımlarda ise tamamen giderildiği görülmektedir. Numune 4 ile Numune 5'e ait mikroyapı görüntüleri karşılaştırıldığında lazer yüzey ergitme ile elde edilen $TiAl_3$ tabakasının daha düşük poroziteye sahip, daha yoğun bir yapıda olduğu görülmektedir.

Numune 4'deki kaplama göz önüne alındığında, XRD analizi sonuçlarında (Şekil 6.4a) Ti piklerinin görülmesi, lazerin tüm kaplama boyunca nüfuz edememesi sonucu, kaplamada dönüşüm geçirmemiş bir miktar saf Ti bulunduğunu göstermektedir. Kaplama yapısında karşılaşılan diğer Ti-Al fazları, lazer uygulaması sırasında çıkılan yüksek sıcaklıklarda $TiAl_3$ fazı ile Ti partikülleri arasında gerçekleşen reaksiyon sonucunda oluşmuştur [3].



Şekil 6.5: Numune 4 yüzeyinde karşılaşılan farklı yapıdaki bölgenin görüntüleri.

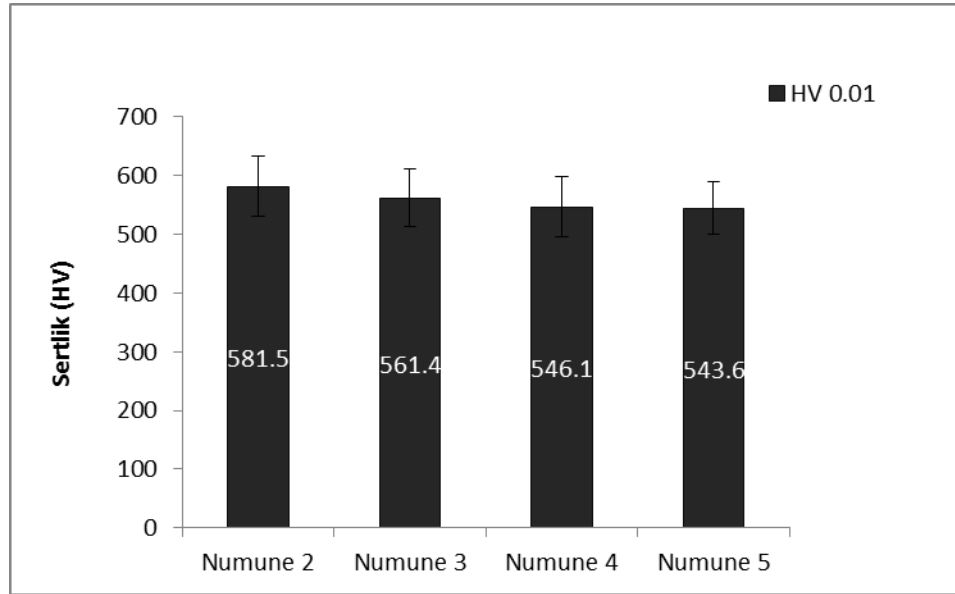
Numune 4’de oluşturulan kaplamanın bir bölgesinde, düşük sertliğe sahip ve kaplamanın kalan kısmından farklı görünümde ötektik katılaşmış olan bir yapı ile karşılaşmıştır. Bu bölgeye ait görüntüler Şekil 6.5’de verilmiştir.

Son işlem olarak ısıtıl işlem uygulanmış Numune 2 ve Numune 5’e ait XRD analizleri (Şekil 6.2a ve Şekil6.4b) karşılaştırıldığında, farklı iki tür kaplama (%100 Al ve %60+%40 Ti-Al) uygulanmış olmasına karşın, her iki uygulamada da tüm kaplamanın %100 $TiAl_3$ fazına dönüştüğü görülmektedir. XRD analizlerinde herhangi bir oksit pikine rastlanmaması, vakum altında gerçekleştirilen prosesin oksidasyonu engellediğini göstermektedir.

6.2 Sertlik Ölçümleri

6.2.1 Yüzey sertlik ölçümleri

Çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin kaplama yüzeylerinden 10g ile ölçülen ortalama sertlik değerleri Şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.6: Yüzeyden 10g ile ölçülen mikro Vickers sertlik değerleri ortalamaları.

En yüksek sertlik değerine Numune 2’de erişilirken Numune 3 ve 4 birbirine çok yakın değerlerde ve en düşük yüzey sertliğini sergilemektedir.

Kaplama gevrekliklerini kıyaslayabilmek için farklı yükler altında gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonucu iz çevresinde ilk çatlak oluşan yük belirlenerek Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Farklı yükler altında çatlak oluşum başlangıcı.

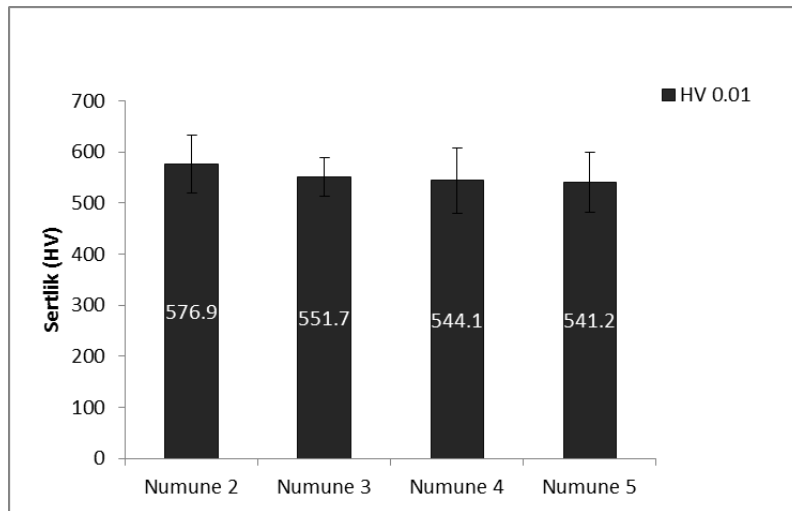
	10 g	25 g	50 g	100 g	200 g	300 g	500 g	1000g
Numune 2	-	-	-	-	+	+	+	+
Numune 3	-	-	+	+	+	+	+	+
Numune 4	-	-	-	-	-	-	+	+
Numune 5	-	-	-	+	+	+	+	+

Çatlama oluşumunun gözlenmediği yüklemeler “-” ile işaretlenirken çatlak oluşumunun gerçekleştiği yükler “+” ile belirtilmiştir.

Çizelge 6.1’e bakıldığında Numune 2, 200 gr’lık yükten itibaren çatlarken Numune 3’de çatlama 50 gr ve üzeri yüklerde gerçekleşmiştir. Bu durum Numune 3’ün Numune 2’den daha gevrek olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Benzer şekilde çatlak oluşumu Numune 4’de 500 gr’da gerçekleşirken Numune 5’in 100 gr yükten itibaren çatlama başlaması, Numune 5’in Numune 4’den daha gevrek olduğunu göstermektedir.

6.2.2 Kesit sertlik ölçümleri

Kapmalarda enine kesitten 10g ile ölçülen ortalama sertlik değerleri Şekil 6.7’de verilmiştir.



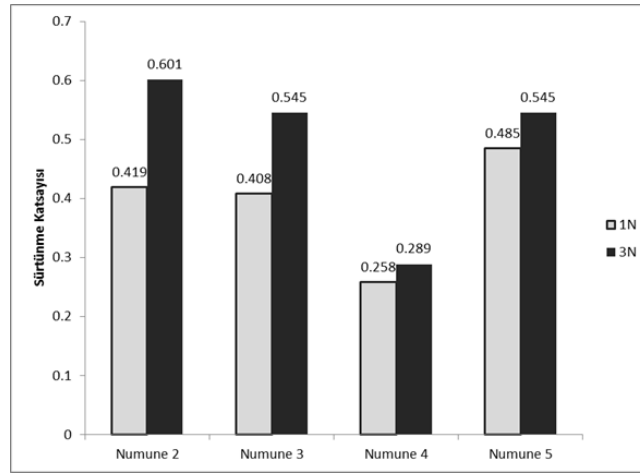
Şekil 6.7: Enine Kesitten 10g ile ölçülen mikro Vickers sertlik değerleri ortalamaları.

Enine kesitten alınan ölçümlerin ortalamaları ile yüzey sertlik değerlerinin ortalamalarına ait grafikler karşılaştırıldığında her iki bölgeden yapılan ölçüm sonuçlarının da birbirine uygun olduğu görülmektedir.

6.3 Kaplamaların Tribolojik Özellikleri

6.3.1 Sürtünme katsayısı değişimi

1N ve 3N yükler altında aşınma testi uygulanan numunelerin sürtünme katsayıları Şekil 6.9’da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere mevcut deney koşullarında diğer numuneler birbirine yakın değerler sergilerken lazer yüzey ergitme uygulanan 4 no’lu numune, diğer numunelere kıyasla çok daha pürüzlü bir yüzeye sahip olmasına karşın, oldukça düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Bu durumun yalnız Numune 4’de karşılaşılan ve mekanik özellikleri kaplamanın genelinden zayıf olan ötektik katılaşmış bölgenin yağlayıcı etki göstermesi sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 6.8: Farklı yüklerde kararlı sürtünme katsayısı değerleri

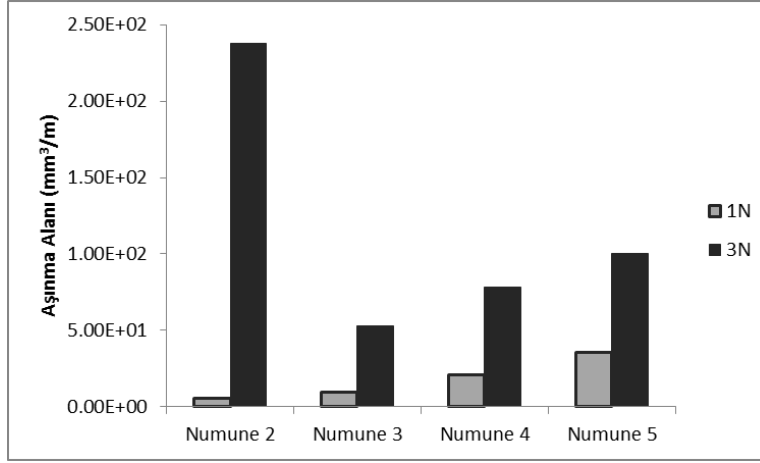
Numunelere ait kararlı sürtünme katsayıları ile zaman-sürtünme katsayısı grafikleri EK A kısmında verilmiştir.

6.3.2 Aşınma hacmi

Şekil 6.9’da kaplamaların 1N ve 3N yükler altında aşınma hacimleri verilmiştir. Profilometre ile elde edilen aşınma izlerinin derinlik ve genişliklerinin ortalamaları hesaplanarak bir kaplamanın ortalama aşınma hacimi hesaplanmıştır. Ölçülen değerler ve standart sapmaları ile yapılan hesaplamalar, aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri ile birlikte EK B kısmında verilmiştir.

3N yük ile uygulanan aşınma testinde Numune 2’de kaplama altlığı kadar aşındığı için aşınma hacminin grafikte bu kadar yüksek görünmesi beklenen bir sonuçtur. Bu

durum kaplamadaki ayrılma gerçekleşen bölgelerin bir sonucu olarak yorumlanmıştır.



Şekil 6.9: Numunelerin farklı yükler altında aşınma hacimleri.

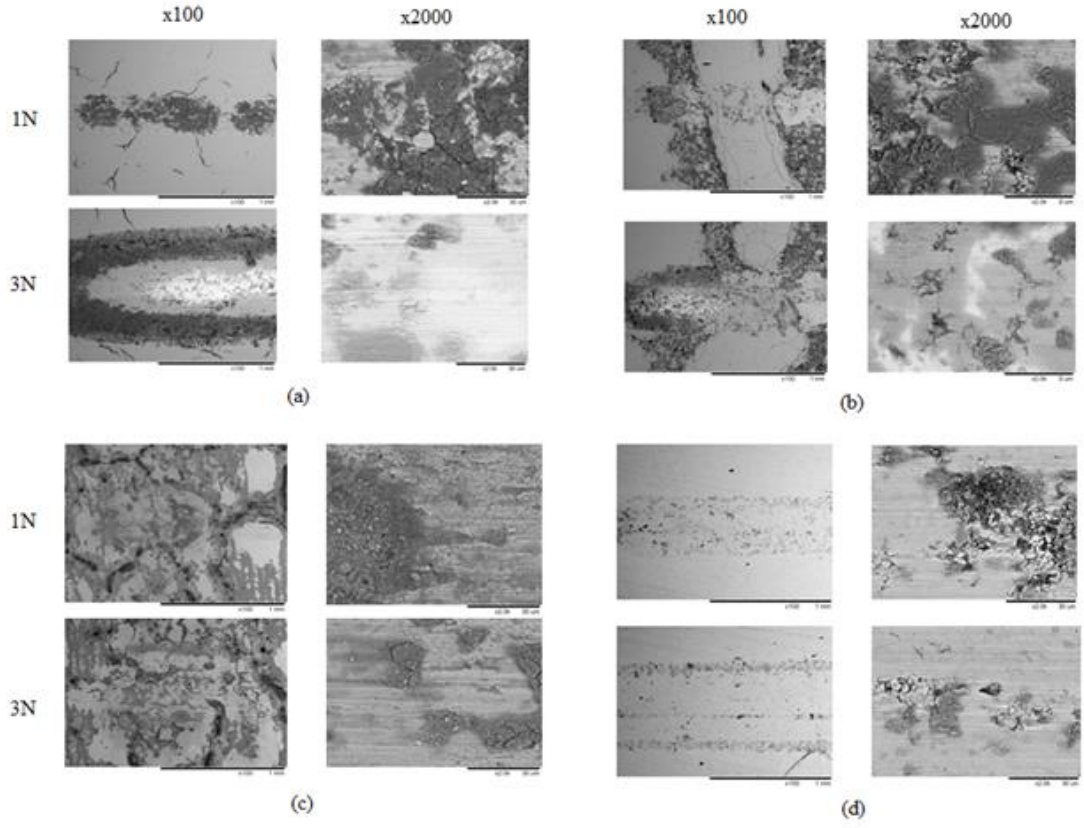
1N yük altında Numune 3, Numune 2'ye oranla daha fazla aşınmıştır. Sertlik testlerinde elde edilen veriler bu sonucu desteklemektedir. Numune 4 ile Numune 5'e ait aşınma oranları arasındaki fark, sertlikleri birbirlerine çok yakın olmasına karşın, Numune 5'in daha gevrek karakterde olmasından kaynaklanmaktadır.

Ayrıca Şekil 6.9'da görüldüğü üzere 3N yük altında yapılan aşınma testlerinde lazer ergitme uygulanan kaplamalar, son işlem olarak ısıtılma işlemi uygulanan kaplamalardan daha düşük aşınma hacimlerine sahiptirler. Bu sonuç Numune 3 ve 4'ün 3N yük altında Numune 2 ve 5'den daha iyi aşınma direnci sergilediğini göstermektedir.

6.3.3 Aşınma yüzeyleri

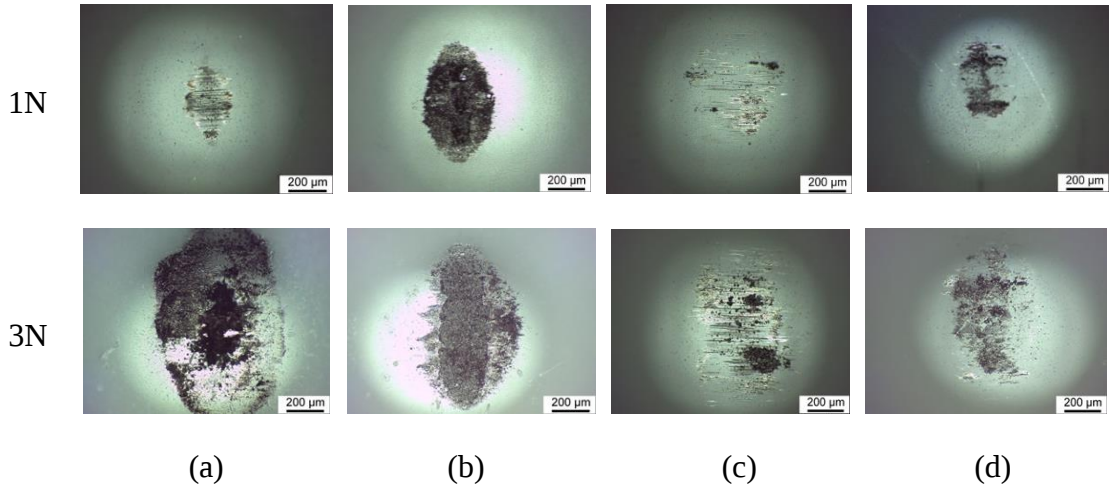
Test edilen numunelerin 1N ve 3N yükler altında aşınma yüzeylerinin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir. Tüm numunelerde artan yük ile birlikte aşınma izlerinin genişlik ve derinliklerinde artış görülmüştür.

Numune 4 hariç tüm numunelerde aşınma sırasında kaplama yüzeyinden ayrılma/atılma görülmüştür. Şekil A.1'de verilen sürtünme katsayısı - zaman grafikleri de bu sonucu destekler niteliktedir. Diğer üç numuneye ait grafiklerde sürtünme katsayısı değerlerinde sıçramalar gözlenirken Numune 4'e ait grafikte, zamana bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi oldukça düzgün bir seyir sahiptir. Ayrıca Numune 2'ye ait sürtünme katsayısı - zaman grafiğinde, katsayı değerindeki artış sonucu, altlığa geçiş açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6.10: Farklı yükler altında aşınma yüzeylerinin x100 ve x2000 büyütmelerde SEM görüntüleri, (a) Numune 2, (b) Numune 3, (c) Numune 4, (d) Numune 5.

Aşınma deneyinde kullanılan Al_2O_3 topun optik mikroskop ile çekilmiş aşınma izi fotoğrafları Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11: Aşınma deneyinde kullanılan Al_2O_3 topa ait aşınma izlerinin x100 büyütmede optik mikroskop görüntüleri, (a) Numune 2, (b) Numune 3, (c) Numune 4, (d) Numune 5.

Toplara ait fotoğraflarda görülen koyu renkli bölgeler, top yüzeyine yapışan aşınma ürünleridir. Şekil 6.11’de görüldüğü üzere artan yüklerle birlikte topa yapışan aşınma

ürünleri miktarı da artmaktadır. Ayrıca en az aşınma ürünü görülen numunenin Numune 4 olduğu görülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği ile Cp-Ti altlıklar üzerine Saf Al tozu ve Ti + Al toz karışımı başarıyla kaplanmıştır ve poroz ve pürüzlü tabakalar elde edilmiştir.

Elde edilen kaplamaların intermetalik dönüşüm geçirmesi ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, kaplamalara ısıtıl işlem ve lazer yüzey ergitme işlemleri uygulanarak 6 farklı grup numune hazırlanmıştır. Bu numunelerden SGDP sonrası yalnız lazer ergitme uygulanan saf Al kaplı numunelerde, lazer uygulaması sonrası kaplamalarda atma gerçekleştiği görülmüştür. SGDP sonrası ısıtıl işlem ve ardından lazer ergitme uygulanan Ti+Al toz karışımı kaplı numunelerde ise son işlemin ardından kaplamalarda yoğun çatlak oluşumu ve bu çatlak bölgelerde kaplamada atma gözlenmiştir. Bu numuneler deneysel çalışmaların ilerleyen aşamalarında kullanılamamıştır.

Mikroyapı incelemelerinde yalnız ısıtıl işlem uygulanan Al kaplı numunede kaplamanın iç kısımlarında porozitelerin yer yer birleşerek kaplamada ayrılmalara neden olduğu görülmüştür. Ayrıca yalnız lazer ergitme uygulanan Ti+Al toz karışımı kaplı numunede lazer uygulamasının altlığa kadar nüfuziyetinin sağlanamadığı belirlenmiştir.

Yapılan XRD analizleri tüm numunelerde $TiAl_3$ intermetalik fazının elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca hem saf Al hem de Ti+Al toz karışımı kaplanan numunelerde, vakum altında ısıtıl işlem sonucu, oksit oluşumu gerçekleşmeksizin tüm kaplamanın %100 $TiAl_3$ 'e dönüştüğü görülmüştür. Lazer ergitme uygulanan numunelerde bu faza ek olarak çok zayıf şiddetli piklerde diğer Ti-Al intermetalik fazlarının ($TiAl$, Ti_3Al , Ti_3Al_2 , $TiAl_2$) oluştuğu da belirlenmiştir.

Yüzeyden ve kesitten alınan sertlik ölçümleri kaplamaların 580-540 $HV_{0.01}$ aralığında sertliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra kaplama yüzeylerine yapılan 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500 ve 1000 gramlık yüklemeler sonucu oluşan iz çevresinde çatlak oluşumu takip edilerek gevreklikleri

kıyaslanmıştır. Saf Al kaplı numunelerde, ısıtıl işlem ardından lazer ergitme uygulanan numunenin daha gevrek olduğu görölürken Ti+Al toz karışımı kaplı numunelerde yalnız ısıtıl işlem uygulanan numunenin daha gevrek karakter sergilediği gözlenmiştir.

Aşınma testlerinde en düşük aşınma oranı, en yüksek sertliğe sahip, yalnız ısıtıl işlem uygulanan saf Al kaplı numunede elde edilmiştir. Kaplamaların sergiledikleri sürtünme katsayıları kıyaslandığında SGDP sonrası doğrudan lazer uygulamasının daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma genel olarak başarılı sonuçlar vermiştir. SGDP tekniği ile oluşturulan kaplamalara ısıtıl işlem ve lazer yüzey ergitme uygulanması ile kaplamalarda istenilen intermetalik fazlar elde edilmiştir ve düşük poroziteli kaplamalar oluşturulmuştur. Lazer uygulaması sonrası, tekrar ergimiş bölgenin kesit görüntülerinde yüzeyden bir tabakanın ergimesi ve ardından hızlı katılaşması ile porozitesi büyük ölçüde giderilmiş ve yoğunlaşmış tabakalar elde edilmiştir.

Lazer yüzey ergitme işleminde kaplamalarda altlığa kadar nüfuziyetin sağlanamaması ve elde edilen kaplamalarda çatlak oluşumu gibi sorunlarla karşılaşmıştır. Lazer işlemi optimize edilerek bu tip problemlerin çözülebileceği düşünülmektedir.

Daha güçlü bir lazer kullanımıyla altlığa kadar nüfuziyet sağlanabileceği gibi, bu çalışmada kullanılan lazer cihazı ve parametreler seçildiği takdirde kaplamaların daha ince hazırlanması önerilmektedir.

Ayrıca SGDP yöntemiyle hazırlanan Al kaplamalara lazer ergitme uygulanacağı takdirde, çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar doğrultusunda, ön işlem olarak ısıtıl işlem uygulanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **A., Astarita, S., Genna, C., Leone, F., Memola Capece Minutolo, F., Rubino, A., Squillace.** (2015). Study of the Laser Remelting of Cold Sprayed Titanium Layer, *Procedia CIRP* 33. 452-457.
- [2] **Y., Liu, D., Wang, C., Deng, L., Huo, L., Wang, R., Fang.** (2015). Novel method to fabricate Ti-Al intermetallic compound coatings on Ti-6Al-4V alloy by combined ultrasonic impact treatment and electrospark deposition, *Journal of Alloys and Compounds* 628. 208-212.
- [3] **S., Romankov, W., Sha, S. D., Kaloshkin, K., Kaevitser.** (2006). Fabrication of Ti-Al coatings by mechanical alloying method, *Surface and Coatings Technology* 201. 3235-3245.
- [4] **S., Romankov, A., Mamaeva, D., Kaloshkin, S., Komarov.** (2006). Pulsed plasma treatment of Ti-Al coatings produced by mechanical alloying method, *Materials letters* 61. 5288-5291.
- [5] **Z., Sun, I., Annergren, D., Pan, T. A., Mai.** (2003). Effect of laser surface remelting on the corrosion behavior of commercially pure titanium sheet. *Materials Science Engineering* 345. 293-300.
- [6] **A., Zhecheva, W., Sha, S., Malinov, A., Long.** (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods, *Surface and Coatings Technology* 200. 2192-2207.
- [7] **J. D., Majumdar & I. Manna.** Laser surface engineering of titanium and its alloys for improved wear, corrosion and high-temperature oxidation resistance. *A volume in Woodhead Publishing Series in Electronic Materials*. 483-521.
- [8] **G., Lütjering & J. C. Williams.** *Engineering Materials And Processes: Titanium (Second Edition)*. Springer.
- [9] **P., Wicinski, H., Garbacz, M., Ossowski, T., Wierzchon, K., Kurzydowski.** (2007). Ti-Al Intermetallic Layers Produced on Titanium Alloy by Duplex Method, *Key Engineering Materials* 333. 285-288.
- [10] **B., Guo, J., Zhou, S., Zhang, H., Zhou, Y., Pu, J., Chen.** (2008). Tribological properties of titanium aluminides coatings on pure Ti by laser surface alloying *Surface and Coatings Technology* 202
- [11] **M., Palm & G., Sauthoff.** Light Intermetallics, *Advanced Light Alloys and Composites*, s. 175-189.
- [12] **S., Taniguchi.** (2008). Oxidation of Ti-Al intermetallic compounds. *Developments in High Temperature Corrosion and Protection of Materials*. 329-364.

- [13] **M., Grujicic, J. R., Saylor, D. E., Beasley, W. S., DeRosset, D., Helfrich.** (2003). Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process *Applied Surface Science* 219. 211-227
- [14] **T., Novoselova, P., Fox, R., Morgan, W., O'Neill.** Experimental study of titanium/aluminium deposits produced by cold gas dynamic spray. *Surface Coatings Technology* 200. 2775-2783.
- [15] **Bayrak, E. S.** (2011). *Al-12Si Matrisli Seramik Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yöntemi ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Z. Liu.** (2015) Laser Applied Coatings, *Procedia CIRP* 33. 2622-2634.
- [17] **T. N, Baker.** (2010). Laser Surface Modification of Titanium Alloys, *Woodhead Publishing Limited*. 398-443.
- [18] **S. B.Sidhu.** (2012). Laser Surface remelting to improve the erosion-corrosion resistance of nickel-chromium-aluminium-yttrium (NiCrAlY) plasma spray coatings, *A volume in Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. 355-366.
- [19] **R., Wislei, R., Osorio, N., Cheung, J. E., Spinelli, K. S., Cruz, A. Garcia.** (2007). Microstructural modification by laser surface remelting and its effect on the corrosion resistance of an Al-9 wt%Si casting alloy. *Applied Surface Science* 254. 2763-2770.
- [20] **J., Sienkiewicz, S., Kuroda, R. M., Molak, H., Murakami, H., Araki, S., Takamori.** (2014). Fabrication of TiAl intermetallic phases by heat treatment of warm sprayed metal precursors, *Intermetallics* 49. 57-64.
- [21] **M. R., Chen, Y., Jiang, Y. H., He, L.W., Lin, B. Y., C. T. Liu.** (2012). Pore evolution regulation in synthesis of open pore structured Ti-Al intermetallic compounds by solid diffusion. *Journal of Alloys and Compounds* 521. 12-15.
- [22] **Q., Peng & B., Yang** (2016). Porous TiAl alloys fabricated by sintering of TiH₂ and Al powder mixtures, *Journal of Alloys and Compounds* 656. 530-538.

EKLER

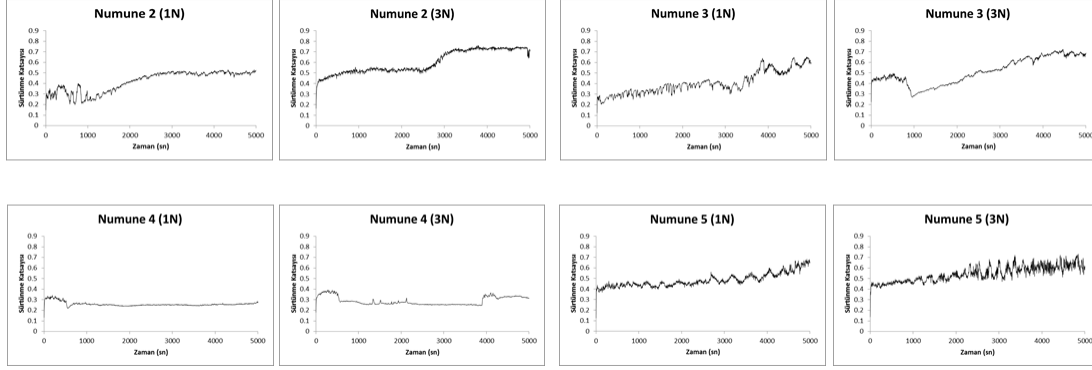
EK A : Sürtünme Katsayıları

EK B : Aşınma Profilleri

EK A

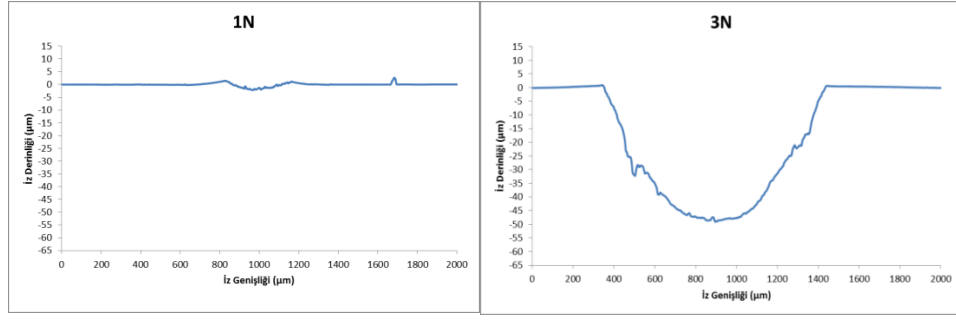
Çizelge A.1: Aşınma testlerinde elde edilen sürtünme katsayı değerleri.

Aşınma Yüğü (N)	Numune 2	Numune3	Numune 4	Numune 5
1	0.419	0.408	0.258	0.485
3	0.601	0.545	0.289	0.545

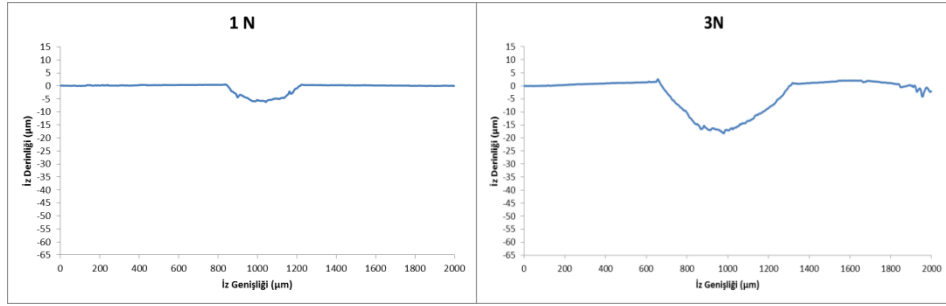


Şekil A.1: Numunelerin farklı yükler altında sürtünme katsayılarının zamana göre değişimi.

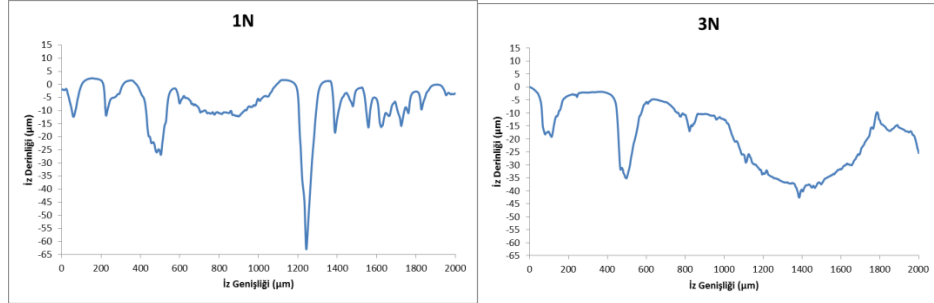
EK B



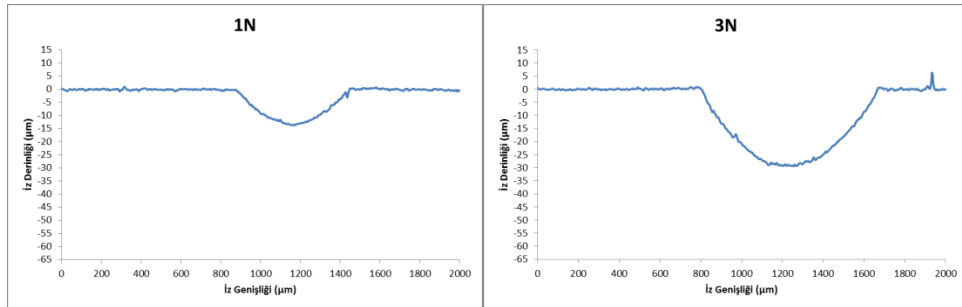
Şekil B.1: Numune 2'nin 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.



Şekil B.2: Numune 3'nin 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.



Şekil B.3: Numune 4'nin 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.



Şekil B.4: Numune 5'nin 1N ve 3N altında aşınma yüzeylerinin profilometre grafikleri.

Çizelge B.1: Numune 2'ye ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi.

1N			3N		
Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)	Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)
357	3.04842	4.2736889	1031	44.28	179.27766
332	3.9913	5.2037011	1162	56.9159	259.71655
341	3.36633	4.5078655	1171	57.84716	266.01053
344	4.63261	6.2581226	1100	49.64823	214.46496
255	6.05499	6.063362	1178	58.51807	270.70431
325.8	4.21873	5.261348	1128.4	53.441872	238.0348
36.2955	1.0668724	0.7979117	56.0307	5.5780792	35.575205

Çizelge B.2: Numune 3'ye ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi.

1N			3N		
Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)	Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)
389	6.57446	10.043141	664	19.1685	49.982284
394	6.58722	10.191973	666	17.0222	44.519451
419	6.20438	10.208744	689	17.38698	47.043894
382	3.98261	5.974355	710	22.61652	63.058555
405	7.38292	11.742027	700	22.22914	61.10554
397.8	6.146318	9.632048	685.8	19.684668	53.141945
12.9831	1.1482063	1.9311044	18.2472	2.3539171	7.5269527

Çizelge B.3: Numune 4'ye ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi.

1N			3N		
Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)	Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)
450	8.83243	15.608192	765	19.4062	58.299036
494	3.71334	7.2036325	810	27.6457	87.937204
512	11.243	22.605453	785	27.497	84.764543
535	14.6969	30.877306	785	22.4705	69.269628
535	12.8203	26.934703	831	28.0801	91.63468
505.2	10.2612	20.645857	795.2	25.0199	78.381018
31.6063	3.79748	8.4159803	22.8945	3.47588	12.601849

Çizelge B.4: Numune 5'ye ait aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik, derinlik ve iz uzunluğu değerleri ile aşınma hacim hesaplarının ortalama ve standart sapma ile gösterimi.

1N			3N		
Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)	Genişlik (μm)	Derinlik (μm)	Hacim (mm^3/m)
558	12.95471	28.387149	870	31.01305	105.95553
556	13.61391	29.724705	875	30.1146	103.47729
576	14.02878	31.732353	882	29.9819	103.84549
634	18.21672	45.35439	882	27.31716	94.615877
627	17.28408	42.557263	856	28.2727	95.038798
590.2	15.21964	35.551172	873	29.339882	100.5866
33.707	2.1152222	7.0006102	9.63328	1.3447786	4.7797372

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Okan GÖK
Doğum Yeri ve Tarihi : Kırşehir, 29 Haziran 1990
E-Posta : okangok90@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans : 2013, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği