

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRKTEME YÖNTEMİ İLE Cu-Al₂O₃
KOMPOZİT KAPLAMASININ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Görkem YUMUŞAK

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRKTEME YÖNTEMİ İLE Cu-Al₂O₃
KOMPOZİT KAPLAMASININ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Görkem YUMUŞAK
(521101009)**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI

HAZİRAN 2012

Aileme ,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda, bilgi ve birikimlerini benden esirgemeyen, her türlü sorunlarıma açıklık getiren, başta danışmanım Sayın Prof. Dr. E.Sabri KAYALI olmak üzere Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU ve Sayın Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında kendi laboratuvar olanaklarını kullanmamı sağlayan Sayın Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU'na, XRD deneylerimi yapan Araş. Gör. Hasan Gökçe'ye ve Yük. Müh. Aziz GENÇ'e teşekkür ederim.

Çalışma sırasında yardımlarından ötürü Araş. Gör. Onur MEYDANOĞLU'na, Araş. Gör. Onur TAZEGÜL'e ve Müh. Çağdaş ÇALLI'ya teşekkür ederim.

Yapılan bu çalışmayı 110M521 nolu proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)' na teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanması sırasında bana yardımcı olan sevgili arkadaşım Cansu KIYAK'a teşekkür ederim.

Son olarak maddi ve manevi desteklerini benden hiç esirgemiyeen aileme sonsuz saygılarımı sunarım.

HAZİRAN 2012

Görkem Yumuşak
(Metalurji ve Malzeme
Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİ	3
2.1 Bakır ve Bakır Alaşımları	4
3. YÜZEY ÖZELLİKLERİNİ GELİŞTİRME YÖNTEMLERİ	7
3.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemi.....	8
3.1.1 Soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminin termal püskürtme yöntemleri ile karşılaştırılması	11
3.1.2 Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin avantajları	12
3.1.3 Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin dezavantajları	13
3.2 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminde Kullanılan Parametreler	14
3.2.1 Püskürtülen tozun özellikleri	14
3.2.2 Nozül geometrisi	14
3.2.3 Gaz türü.....	15
3.2.4 Gaz sıcaklığı.....	17
3.2.5 Gaz basıncı.....	17
3.3 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminin Uygulamaları.....	18
3.3.1 Elektrik uygulamaları	18
3.3.2 Korozyondan koruma uygulamaları	19
3.3.3 Aşınma direnci geliştirme uygulamaları.....	19
3.4 Literatürde Bulunan Benzer Çalışmalar	20
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
4.1 Uygun Parametrelerin Seçilmesi için Yapılan Çalışmalar	27
4.1.1 Kaplama işlemi.....	27
4.1.2 Kaplanmış yüzeylerin yapılarını inceleme deneyleri	27
4.1.3 Sertlik deneyleri	28
4.2 Uygun Parametreler Seçildikten Sonra Yapılan Çalışmalar.....	28
4.2.1 Kaplama işlemi	29
4.2.1.1 Değişik seramik oranındaki kaplama işlemleri	29
4.2.2 Kaplanmış yüzeylerin yapılarını inceleme deneyleri	30
4.2.3 Sertlik deneyleri	30
4.2.4 Isıl işlem deneyleri	30
4.2.5 Elektrik iletkenliği deneyleri.....	30
4.2.6 Aşınma deneyleri.....	31
4.2.7 Korozyon deneyleri	32

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	33
5.1 Uygun Parametrelerin Seçilmesi için Yapılan Çalışmaların Sonuçları	33
5.2 Uygun Parametreler Seçildikten Sonra Yapılan Çalışmaların Sonuçları	37
5.2.1 Kaplanmış yapıların yüzey incelemeleri	37
5.2.2 Sertlik deney sonuçları	44
5.2.3 Elektrik iletkenliği değerleri	45
5.2.4 Aşınma deneyi sonuçları	46
5.2.5 Korozyon deneyi sonuçları	50
6. GENEL SONUÇLAR.....	53
KAYNAKLAR.....	55
EKLER	59
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

SGDP	: Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-ışınları Difraksiyonu
HV	: Vickers Sertlik Değeri
EDS	: Elektron Kırınım Spektroskopi
OCP	: Açık Devre Potansiyeli
OM	: Optik Mikroskop

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yaygın olarak kullanılan elektrik kontak malzemelerinin elektrik iletkenlik değerleri.....	5
Çizelge 3.1 : Taşıyıcı gazların özellikleri	15
Çizelge 4.1 : SGDP yönteminde kullanılan parametreler.....	29
Çizelge 4.2 : Aşınma deneyi parametreleri	31
Çizelge 5.1 : Kaplamaların ısıtıl işlemli ve işlemsiz hallerinin XRD analizlerindeki pik genişlik değerleri	43
Çizelge 5.2 : Kaplama yapılarında bulunan % seramik miktarları	44
Çizelge 5.3 : Değişik seramik oranlarındaki kaplamaların kaplama kalınlığı ve sertlik değerleri.....	44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Bakır elektrot üzerinde meydana gelen aşınma örneği.....	3
Şekil 3.1	: SGDP tekniği ekipmanlarının şematik gösterimi.	8
Şekil 3.2	: Laval tipi nozülün şematik gösterimi.....	9
Şekil 3.3	: Toz boyutu ile çarpma hızının kaplama malzemesinin altlık üzerine çarpması sırasında gerçekleşecek olan mekanizmaya etkisi.....	10
Şekil 3.4	: Birikme verimliliği ile toz hızı ilişkisi.	10
Şekil 3.5	: SGDP yöntemi ile termal püskürtme yöntemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıklarının ve partikül hızlarının karşılaştırılması	12
Şekil 3.6	: Proses gaz tipi ile kaplama verimliliği değişimi.....	16
Şekil 3.7	: Proses gaz sıcaklığı ile kaplama verimliliği değişimi.....	17
Şekil 3.8	: Alüminyum altlık üzerine SGDP yöntemi ile yapılan bakır kaplama görüntüsü.....	18
Şekil 3.9	: SGDP yöntemi ile yapılan korozyondan koruma uygulaması	19
Şekil 4.1	: Deneysel akım şeması	28
Şekil 5.1	: Hacimce %25 Al ₂ O ₃ içeren toz karışımı ile farklı hızlarda yapılmış kaplamaların makro fotoğrafları	33
Şekil 5.2	: Hacimce %25 Al ₂ O ₃ içeren toz karışımı ile 1 ve 2.5 mm/s hız değerlerinde ve farklı paso sayısında yapılmış kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	34
Şekil 5.3	: Hacimce %25 Al ₂ O ₃ içeren toz karışımı ile 5 ve 7,5 mm/s hız değerlerinde ve farklı paso sayısında yapılmış kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri	35
Şekil 5.4	: %25 Al ₂ O ₃ içeren karışım ile elde edilen kaplamaların hız, paso sayısı ve kaplama kalınlığı ilişkisi	36
Şekil 5.5	: %25 Al ₂ O ₃ içeren karışım ile elde edilen kaplamaların hız, paso sayısı ve sertlik ilişkisi	36
Şekil 5.6	: Hacimce %25 Al ₂ O ₃ içeren toz karışımı ile 5mm/s hız değerinde ve 4 paso sayısında yapılmış kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri	37
Şekil 5.7	: Hacimce %25 Al ₂ O ₃ içeren toz karışımı ile yapılmış kaplamaların XRD paternleri	38
Şekil 5.8	: Hacimce %12,5 Al ₂ O ₃ içeren toz karışımı ile 5mm/s hız değerinde ve 4 paso sayısında yapılmış kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.	39
Şekil 5.9	: Hacimce %12,5 Al ₂ O ₃ içeren toz karışımı ile yapılmış kaplamaların XRD paternleri.	40
Şekil 5.10	: Saf bakır tozları ile 7.5 mm/s hız değerinde ve 4 paso sayısında yapılmış kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	41
Şekil 5.11	: Saf bakır tozları ile yapılmış kaplamaların XRD paternleri.....	42
Şekil 5.12	: Değişik ısıtım işlem uygulanmış kaplamaların sertlik değerleri.	45

Şekil 5.13 : Değişik seramik miktarı içeren kaplamaların farklı ısı işlem uygulanması durumunda ortalama elektrik iletkenliği değerleri	46
Şekil 5.14 : Isıl işlemli ve işlemsiz kaplamalara ait rölatif aşınma değerleri	47
Şekil 5.15 : Isıl işlemli ve işlemsiz kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri	48
Şekil 5.16 : Isıl işlemsiz numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (1500x) ve bilyada oluşan izin optik mikroskop (OM) görüntüleri (100x)	49
Şekil 5.17 : Korozyon yüzeylerinin SEM görüntüleri	50
Şekil 5.18 : Anodik polarizasyon eğrileri, (a) ısıl işlemsiz, (b) 300°C, (c) 600°C’de ısıl işlem görmüş numuneler	52
Şekil A.1 : Hacimce %25 Al ₂ O ₃ içeren kaplamaların değişik ısıl işlem şartlarındaki aşınma izi profilleri.	60
Şekil A.2 : Hacimce %12,5 Al ₂ O ₃ içeren kaplamaların değişik ısıl işlem şartlarındaki aşınma izi profilleri.	61
Şekil A.3 : Saf bakır tozları içeren kaplamaların değişik ısıl işlem şartlarındaki aşınma izi profilleri.	62
Şekil A.4 : Hacimce %25 Al ₂ O ₃ içeren kaplamaların değişik ısıl işlem şartlarındaki sürtünme katsayıları.	63
Şekil A.5 : Hacimce %12,5 Al ₂ O ₃ içeren kaplamaların değişik ısıl işlem şartlarındaki sürtünme katsayıları.	64
Şekil A.6 : Saf bakır tozları içeren kaplamaların değişik ısıl işlem şartlarındaki sürtünme katsayıları	65
Şekil A.7 : 300°C ısıl işlem uygulanmış numunelerin aşınma izi 500x SEM görüntüleri	66
Şekil A.8 : 600°C ısıl işlem uygulanmış numunelerin aşınma izi 500x SEM görüntüleri	67
Şekil A.9 : 300°C ısıl işlem uygulanmış numunelerin aşındırıcı bilyalarında oluşan izin 100x OM görüntüleri	68
Şekil A.10 : 600°C ısıl işlem uygulanmış numunelerin aşındırıcı bilyalarında oluşan izin 100x OM görüntüleri.	69

SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE Cu-Al₂O₃ KOMPOZİT KAPLAMASININ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bakır ve bakır alaşımları yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, iyi mukavemet ve süneklik değerleri, kolay işlenebilirlik, korozyon dayanımı ve düşük fiyat gibi özelliklere sahip olmalarından dolayı çok fazla alanda elektrik kontak malzemesi olarak kullanılabilirler. Bu alanlarda kullanılan malzemelerin kontak hallerinden dolayı yüzeylerinde aşınma oluşabilir ve bu aşınma çalışmanın durmasına neden olabilmektedir. Bakırın iyi özelliklerinin yanı sıra düşük sertlik ve düşük aşınma dayanımı gibi zayıf özelliklerinden dolayı bakırın değişik yöntemler kullanılarak yüzey özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Birçok kaplama ve biriktirme tekniği bu amaç için kullanılabilir. Bunlara termal püskürtme ve soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemlerini örnek verebiliriz. Termal püskürtme yöntemlerinde çok yüksek sıcaklıklarda çalışılması nedeni ile kaplama esnasında metal matrisin erimesi gibi problemlerle karşı karşıya gelinebilmektedir. Metal matrisin erimesi durumunda yapının içinde bulunan seramik partiküller düzgün bir biçimde dağılamıyacağı için homojenizasyonu sağlamak oldukça zor olacaktır. Yapılan çalışmalarda, düşük poroziteli ve altlığa iyi yapışmış kaplamaları elde etmenin zor olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek sıcaklığa bağlı olarak metal partikülleri oksitlenmekten korunamamaktadır. Soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği termal püskürtme yöntemlerinde ortaya çıkan bu gibi problemlerin çözülmesi amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir.

Bu çalışmada, soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan bakır altlık üzerine bakır matrisli seramik partikül takviyeli kompozit kaplanabilirliği araştırılmıştır. Bakırın kullanıldığı uygulama alanında en gerekli özelliklerden biri olan elektrik iletkenliğini koruyarak, sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini geliştirmek hedeflenmiştir. Böylece elektrik iletkenliğinden feragat etmeden kontak malzemelerinin servis ömürleri uzatılacak ve bakım giderleri azaltılacaktır. Bu amaç ve hedefler doğrultusunda en kullanışlı kaplamaları üretmek amacıyla soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kullanılacak olan parametreler dikkatlice seçilmiştir.

Uygun parametreler kullanılarak üretilen kaplamaların uygulanan metalografik işlemlerden sonra genel olarak yapıları incelenmiş ve ardından sertlik, elektrik iletkenliği, aşınma dayanımı ve korozyon dayanımı gibi özellikleri belirlenmiştir. Kaplamaları daha yoğun bir hale getirmek amacıyla değişik sıcaklıklarda ısıtılacak ve ısıtıldıktan sonra işlemsiz hallerine yapılan deneyler tekrar edilmiş ve ısıtılma işleminin kaplama özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca kaplamaların üretimi esnasında kullanılan Al₂O₃ miktarları değiştirilerek kaplamalar yapılmış ve seramik miktarının kaplama üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

Karakterizasyon işlemleri sonucunda, sertlik değerlerinde Al_2O_3 miktarının artırılması fazla bir gelişme sağlamamıştır. %12,5 seramik oranı ile yapılan kaplamaların verimi %25'liğe göre daha yüksek çıkmıştır. Isıl işlem uygulaması ile sertlik değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Elektrik iletkenliği değerlerinin seramik miktarına bağlı olarak çok az miktarda değiştiği görülmekle birlikte yapılan ısıl işlem uygulamaları sonucunda elektrik iletkenliği değerleri her seramik oranında doğrusal olarak değişmiştir. Altlık malzemenin başlangıçtaki elektrik iletkenliği değerinin 55 MS/m olduğu göz önünde bulundurulduğu zaman, saf bakırla yapılmış kaplamanın 600°C ısıl işleminden çıkan elektrik iletkenliği sonucunun (41 MS/m) saf altlık bakıra en yakın değerde olduğu görülmüştür.

Aşınma testlerinin sonucunda oluşan izler üzerinden profilometre yardımı ile alınan genişlik ve derinlik değerleri kullanılarak ortalama aşınma izi alanları hesaplanmıştır. Bu alan değerleri dikkate alındığında en büyük alan hacimce %25 Al_2O_3 içeren kaplamanın 300°C'deki ısıl işlemli halinde bulunmuştur. En az aşınma saf bakır tozlarla yapılmış kaplamaların 300°C'deki ısıl işlemli halinde ortaya çıkmıştır.

Korozyon deneyleri sonucunda elde edilen anodik potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre, kaplama numuneleri seramik miktarına bağlı olmaksızın aynı korozyon davranışı göstermişlerdir. İncelenen eğrilerde kaplama ve altlık numunelerinin akım yoğunluğu ve potansiyel değerlerinde çok küçük değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Korozyon deneyleri sonucunda oluşturulan grafiklerdeki akım yoğunlukları hesaplanırken kullanılan uygulama alan değerleri tüm numuneler için 25mm² seçilmiştir. Kompozit kaplamaların içindeki seramik miktarları çok az miktarda olduğundan, uygulama alanında yapmış oldukları değişimler ihmal edilmiştir. Isıl işlem uygulamaları yapılmış numunelerde oluşan yüzey alanı küçülmeleri, akım yoğunluğu değerlerinde ısıl işlem uygulanmamış numunelere göre daha yüksek değerler göstermişlerdir.

Sonuç olarak, elektrik iletkenliği değerleri ve aşınma deneylerinin sonuçları dikkate alındığında, bakır altlık malzemesinin yüzey özelliklerini geliştirmek amacı ile 600°C'de ısıl işlem uygulanmış olan saf bakır tozları ile yapılmış kaplamalar tercih edilebilir.

THE PRODUCTION OF Al_2O_3 COMPOSITE COATING BY COLD GAS DYNAMIC SPRAYING TECHNIQUE AND ITS CHARACTERIZATION

SUMMARY

Copper and copper alloys have some features such as high thermal and electrical conductivity, good structural strength and ductility, easy processability, corrosion resistance and low price so that they can be used in too many areas as electrical contact materials. Formation of the wear on the surface of the material used in these areas can lead to stop working. As well as the the good properties of copper, they have some poor properties such as low hardness and low wear resistance. Due to these adverse properties, surface properties such as wear resistance of copper used as electrical contact should be developed by using various methods. Lots of coating and deposition techniques are used for this purpose. Thermal spraying and cold gas dynamic spraying can give examples for these surface modification techniques. Because of very high working temperatures, thermal spray coating methods are encountered some problems such as melting of the metal matrix. In case the melting of the metal matrix, ceramic particles in the structure can not be dispersed properly, so it is difficult to provide homogenization. In addition, it is difficult to obtain coating with low porosity and protect the coating from oxidation. Cold gas dynamic spraying technique is developed in order to solve these thermal spraying problems.

Cold gas dynamic spraying is a process that was developed by Russian Professor Anatolii Papyrin in the mid 1980's. Pure metals, metal alloys, polymers and composites were successfully coated on various substrates. This process depends on the deposition of solid powders on substrate surface without melting. There are some process parameters which should be chosen carefully to supply good deposition efficiency such as particle velocity, nozzle geometry, gas type, gas temperature, gas pressure and characteristic properties of sprayed powder. The coatings which are produced by cold spray process can be used in electrical / electronic, aerospace, automotive and chemical industries in order to develop different characteristics of these areas. They can be used in abrasion resistance and corrosion protection applications.

In this study, the coatability of Al_2O_3 particles reinforced copper matrix composite to the copper substrate which is used as a electrical contact materials were investigated. It is targeted to improve the mechanical properties, such as hardness and wear resistance, while maintaining high electrical conductivity which is one of the most essential features for the application of copper. Thus, without renouncing the electrical conductivity of the contact materials, it will extend the service life and reduced maintenance costs. In this conditions, the most useful parameters should be carefully chosen used in cold gas dynamic spray techniques to realized our objectives.

After optimisation process for composite coatings include 25 vol.% alumina, these parameters were tried for feedstock which contain lower ceramic powder (12.5 vol.%) and pure copper coatings (100% copper). In this condition the effect of ceramic amount on the properties of coatings were observed. Then, it was performed metallographic operations to all coatings which produced using the appropriate parameters, the microstructure of coatings were analysed and then they were investigated for hardness, electrical conductivity, wear resistance and corrosion resistance properties. The coatings are heat treated at various temperatures with the intent of providing more dense structures, and all experiments were repeated for heat treated samples in order to examine the effect of heat treatment on the properties of coatings.

The experimental studies were started with the optimisation of process parameters. Firstly, mixture of 25 vol.% Al_2O_3 and 75 vol.% copper were used during the optimisation processes. Four different (1, 2.5, 5 and 7.5) traverse speed and three different (1, 2 and 4) number of pass were tried to choose the optimum parameters. Optimum parameters were determined with respect to the coating thickness, hardness and oxidation behaviour. After better parameters obtained for feedstock which contain 25 vol.% ceramic, these parameters were tried for feedstock which contain 12.5 vol.% Al_2O_3 and pure copper coatings.

In optimisation process, it is seen that oxidation of coatings increases with decreasing traverse speed and increasing number of pass. The coating thickness increases with increasing number of pass at constant traverse speed and the higher coating thickness values obtained with lower traverse speed at a constant number of pass. According to results obtained from the coatings produced with the feedstock which contains 25 vol.% Al_2O_3 and 75 vol.% copper, traverse speed of 5 mm/sec and 4 pass were chosen as optimum process parameters. During production of coatings compressed air with bar of 6 used as a process gas. Powder feeding rate of 2 from the equipment setting scale of 8 and standoff distance of 10 mm were used for coating process.

After production of coatings, optical and scanning electron microscope are used for microstructural examinations and mechanical properties determined by the hardness measurements and wear test. Electrical conductivity measurements was performed for understand if the coatings can work as a electrical contact materials or not. Also corrosion test was performed to the coatings to show how these coatings work at violent conditions.

All coatings bond to the substrate successfully. For composite coatings, there is no pore in the coating or discontinuity at the interface. Also, ceramic particles were uniformly distributed in the coating. The ceramic content in the coatings was determined via image analyse software. The ceramic contents in the coatings are not equal to the feedstock's ceramic contents. The value of ceramic in the coatings is 4.9 vol.% while it is 25 vol.% in feedstock. Ceramic particles are surrounded by metal particles due to the plastic deformation and locked up in the structure so that a lot of portion of ceramic particles rebound from the surface of substrate. For this reason, the efficiency of deposition is very low. Because of this bad efficiency the Al_2O_3 phase could not be determined on the XRD patterns for both composite coatings which contain 12.5 vol.% Al_2O_3 and 25 vol.% Al_2O_3 . And also any intermetallic phases were not detected on the XRD patterns of the composite and pure coatings. Peak broadening occurred by the reason of plastic deformation. After heat treatment, FWHM values of coatings reduced.

Hardness measurements performed with the weight of 25 gr. and dwelling time 10 sec. Coating hardness did not change significantly with the ceramic particles because of very low percentage of ceramic particles in the coating. When we look at ceramic ratio in the coatings which contain 25 vol.% and 12.5 vol.% ceramic, the ratio is very near each other so that the hardness values are almost same. The biggest hardness values of the coatings were equal to the $202\text{HV}_{0.025}$ and this value approximately twice of substrate hardness which is nearly equal to $106\text{HV}_{0.025}$, but after heat treatment at 600°C , hardness of coatings decreased to the substrate hardness. Heat treatment dramatically reduced the hardness of coatings. This reduction is the result of removing of internal stresses (proved by the reduction of XRD patterns width) in the coating.

Electrical conductivity of coatings increased with heat treatment and the highest value was obtained 300°C heat treated coating which contain 12.5 vol.% ceramic. Increasing of conductivity could be explained by the reduction of internal stresses in the coating. Also, cohesion between copper particles and between copper and ceramic particles because of the sintering effect of heat treatment enhanced the conductivity of coatings.

Wear tests were performed with the load of 4N. Steel ball with 6mm in diameter was used with the sliding speed of 10 mm/s. Tests were accomplished along a sliding length of 50 m and wear track length of 5 mm. Comparison of wear performances of coatings were done by wear track areas of coatings which were calculated from the wear track profiles. The most wear is seen at the coating which contains 25 vol.% Al_2O_3 and heat treated at 300°C . The lowest wear rates obtained for pure coating which was heat treated at 300°C . According to the tests results ceramic addition to copper matrix inversely affected the coatings wear performance. The wear rate of substrate was determined as higher than composite coating which contain 12,5 vol.% Al_2O_3 and pure copper coatings for all heat treatment cases. At the end of the examinations, it is decided that oxidative and adhesive wear mechanism occurred during the wear test.

Electrochemical corrosion test was done between the potential of OCP-0.8 and OCP+1.2 with the scan rate of 1 mV/s in NaCl solution. In regard to the potentiodynamic polarisation curves, all coatings showed the same corrosion behaviour regardless of the ceramic amount of the coatings. There is no significant change in current density and potential values for both coatings and substrate on the polarisation curves. While calculating the current density values for all coatings, the surface area was selected 25mm^2 . Any change in the surface area which arising from ceramic particles has been neglected for composite coatings, because the amount of ceramic in the composite coatings are too small. The samples which were heat treated have higher current density values than the non heat-treated samples. The reason for this condition can be the surface area shrinkage of the samples which were heat treated at any temperatures.

As a result of all process, pure copper coating which was heat treated at 600°C can be produced to improve the surface properties of copper with respect to the results of wear test and electrical conductivity measurements.

1. GİRİŞ

Bakır metalinin elektrik kontak malzemesi olarak kullanılması diğer metallere göre çok önemli bir yer tutmaktadır. Örneğin kablo ve tel malzemesi, iletkenlik gerektiren elektrik parçaları, transformatör sargıları, kaynak elektrotları gibi ürünlerin üretiminde elektrik kontak malzemesi olarak kullanılırlar. Bakır önemli avantajları sayesinde küçük tel kablo olarak alüminyumun yerine tercih edilir. Bu tercihin sebebi de alüminyumun bakıra göre daha çok sorun çıkartan kontak özelliğine sahip olmasıdır. Bakırın diğer bir avantajı da çok geniş yelpazede alaşım yapabilme özelliğidir. Bu özelliği sayesinde istenilen mekanik özelliklere sahip olabilen bakır alaşımı üretebilmek kolay olmaktadır. Bakırın bu gibi avantajları yanında, zayıf aşınma özelliğinin olması yüzey özelliklerini geliştirme teknikleri kullanılarak bakırın bu gibi kötü özelliklerinin iyileştirilmesini gerektirmektedir.

Bakırın yüzey özelliklerini geliştirmek amacı ile kullanılan tekniklere fiziksel ile kimyasal buhar biriktirme, termal püskürtme, kutu sementasyon, iyon yerleştirme ve lazer kaplama örnek verilebilir. Termal püskürtme yöntemleri ile yapılan kaplama sırasında metal matrisin ergimesi nedeniyle seramik partiküllerin homojen dağılımı güçleşmektedir. Bu sebeple kaplamanın yapısında porozite miktarı artmakta ve yoğun bir kaplama elde edilememektedir. Aynı zamanda termal püskürtmede kaplamayı oksitlenmeden korumak oldukça zordur [1]. Soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği termal püskürtme yöntemlerinde ortaya çıkan kaplamadaki boşluklar, oksitlenme ve düşük yapışma mukavemeti gibi problemlerin çözülmesi amacı ile geliştirilmiş bir tekniktir [2].

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi yukarıda sayılan başarılı özellikleri ile çok büyük olan kaplama ailesinin içine girmiştir. Genel olarak katı haldeki küçük parçacıklar (1-50 μ m) yüksek hızlara (300-1200m/sn) hızlandırılarak uygun bir altlık malzemesi üzerine püskürtülmesi sayesinde tozlar sıkışma sürecine girerler. Bu parçacıklar altlık malzemeye ve kendi kendilerine çarpmaları sayesinde kaplama yapısını oluştururlar. Yüksek hızlardaki çarpışmalar sayesinde parçacıkların ve altlık malzemenin yüzeyindeki oksit tabakalar bozulur ve yüksek arayüzey basınç ve

sıcaklık değerleri sayesinde atom yapıları birbirleri üzerine baskı yaparak yakın temasa geçerler ve yapışma işlemini gerçekleştirirler [3].

Bu çalışmada amaç elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan bakırın yüzeyinde soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği ile bakır matrisli seramik partikül takviyeli kompozit kaplanabilirliğinin araştırılmasıdır. Hedef, bakırın yüksek iletkenliğini koruyarak mekanik özelliklerini (sertliğini, aşınma direnci) geliştirmektir. Böylece elektrik iletkenliğinden çok fazla feragat etmeden kontak malzemelerinin servis ömürleri uzatılacak ve bakım giderleri de azalacaktır. Çalışma kapsamında kaplama işlemleri alüminyum oksit seramik malzemesinin farklı hacim oranlarında bakır tozlarına karıştırılmasıyla hazırlanan kaplama tozları ile yapılarak, mikro yapı, sertlik, aşınma, elektrik iletkenliği ve korozyon dayanımı açısından optimum özellikleri sağlayan toz karışımları ve kaplama parametreleri belirlenmiştir.

2. ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİ

Elektrik kontak malzemeleri geniş bir kullanım alanına sahip olan, elektrik devresi içerisinde iki alt sistemin kabul edilemeyecek herhangi bir hasara sebep olmadan birbirinden ayrılmasını sağlayan elektro mekanik parçalardır [4]. Çalışma esnasında meydana gelebilecek herhangi bir hasar sistemin durmasına ve dolayısıyla üretimin aksamasına yol açabilir. Bu gibi kötü problemlerle karşılaşmamak için sistemin içerisinde kullanılan elektrik kontak malzemelerini, çalışma koşullarını göz önünde bulundurarak seçmek gerekmektedir. Örneğin elektrik kontak malzemeleri çalışma sırasında göreceli harekete maruz kalır [5], bu nedenle çalışma esnasında malzeme yüzeyinde aşınma oluşmaktadır [6]. Şekil 2.1’de elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan bakır elektrot üzerinde meydana gelen aşınma örneği gösterilmiştir. Yüzeyde oluşan bu aşınmanın devam etmesiyle birlikte oluşan malzeme kayıpları, kontak eden yüzeylerin birbirinden ayrılmasına neden olarak çalışan sistemin performansını düşürmektedir.



Şekil 2.1 : Bakır elektrot üzerinde meydana gelen aşınma örneği

Günümüzde, yaşamın her alanında elektrik ile çalışan cihazları kontrol etmek amacıyla kontak malzemeleri kullanılmaktadır. Bu kontak malzemesinin çalışırken herhangi bir sorunla karşılaşmadan bütünlüğünü koruyabilmesi için, seçilmiş olan malzemenin öncelikle yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Malzemelerin elektrik iletkenliğinin yüksek olmaması veya zamanla kontakların oksitlenmesiyle iletkenlik özelliklerinin düşmesi malzemenin çalışma esnasında elektriğe direnç göstererek hızlı bir şekilde ısınmasına yol açabilir [7]. Bu sebeple

yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin seçilmesi de elektrik kontak malzemeleri için önemlidir.

Elektrik kontak malzemelerinin sürekli açılıp kapanma esnasında oluşan akım yoğunluğu , yüksek sıcaklıkla birleşince malzeme yüzeyi üzerinde korozyona sebep olmaktadır [5]. Korozyona uğrayan malzemenin hareket esnasında daha kolay aşınmaya uğraması sebebiyle malzemenin ömrü çok kısalmaktadır. Bu sebeple yüksek korozyon dayanımına sahip malzemelerin kullanılması, sistemin çalışması esnasında meydana gelen açma-kapama sayısını ve malzemenin yenilenme süresini artırmaktadır. Kullanılan malzeme-zaman oranının azalması ile birlikte, kullanıcının ekonomik olarak kazancı artmaktadır. Bu kazanımın sağlanması için çalışma koşullarına uygun malzeme seçilmesinin yanı sıra, kullanılan malzemenin yüzey özellikleri de geliştirilebilir.

2.1 Bakır ve Bakır Alaşımları

Bakır ve bakır alaşımları, ticari metallerin büyük bir grubunu oluşturmaktadırlar. Mükemmel elektriksel ve termal iletkenliği , korozyona karşı dayanıklılığı , kolay işlenebilirliği ve iyi yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çizelge 2.1’de elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan bazı metallerin elektrik iletkenliği değerleri verilmiştir. Genellikle manyetik özellikleri zayıf olmakla birlikte, çeşitli gazlarla kolaylıkla kaynak yapılabilirler. Bakır ve bakır alaşımları organik malzemelerin üzerine kolaylıkla kaplanabilirler. Saf bakır; kablo, tel yapımında ve elektrik kontak malzemesi olarak kullanılabilirken, bazı bakır, pirinç ve bronz gibi alaşımları ise otomobil radyatörü, ev ısıtma sistemleri, güneş enerjisi panelleri üretiminde kullanılabilirler. Yüksek korozyon dayanımı sayesinde de su boruları, vanalar ve bağlantı parçaları olarak kullanabilirler [8].

Bakır ve bakır alaşımları sahip oldukları yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, iyi mukavemet ve süneklik değerleri, yüksek korozyon dayanımı, kolay işlenebilme ve düşük fiyat gibi özellikleri nedeni ile gümüş ve altının yanı sıra elektrik kontak malzemesi olarak tercih edilmektedir [9]. Bakırın ve bazı metallerin elektrik iletkenlik değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Elektrik kontak malzemesi olarak kullanılabilen bakır alaşımlarına, gümüş-bakır, bakır-nikel, bakır-kurşun, bakır-nikel-çinko, bakır-altın, bakır-kalay, bakır-zirkonyum, bakır-altın-gümüş, bakır-tungsten,

bakır-alümina, bakır-grafit, bakır-sülfür, bakır-paladyum, bakır-krom ve bakır-berilyum gibi alaşımlar örnek verilebilir. İstenilen mekanik özelliklere göre değişik alaşımlar istenilen uygulamalarda kullanılabilir.

Çizelge 2.1 : Yaygın olarak kullanılan elektrik kontak malzemelerinin elektrik iletkenlik değerleri [10].

Malzeme	Elektrik iletkenliği (S/m) 20°C
Gümüş	6.21×10^7
Bakır	5.85×10^7
Altın	4.42×10^7
Alüminyum	3.69×10^7

Bakırın yukarıda sayılan iyi özelliklerine karşı sertliğinin düşük olmasından dolayı adhezif ve abrezif aşınma dayanımı düşüktür. Bu nedenle daha uzun ömürlü bir çalışma süresi için bakırın yüzey özelliklerinin geliştirilmesine olan ilgi artmaktadır [9]. Bakırın zayıf aşınma özelliğinin geliştirilebilmesi amacı ile malzeme sertleştirme veya yüzey özelliklerini geliştirme tekniklerinden faydalanılmaktadır.

3. YÜZEY ÖZELLİKLERİNİ GELİŞTİRME YÖNTEMLERİ

Malzeme sertleştirme tekniklerinden, yaşlandırma ve dispersiyon sertleştirilmesi genel olarak bakırın sertleştirilmesinde seçilen iki yöntemdir. Yaşlandırılmış bakırın uygulama sırasında 500°C üzerinde kullanılması çöken fazların büyümesi probleminden dolayı yetersiz mukavemet göstermesine neden olmaktadır. Buna karşılık sert partiküllerin metal matris içerisine dağıtılması temeline dayanan metal matrisli kompozit üretimi daha uygun bir tekniktir. Bu amaçla toz metalürjisi metal matrisli kompozit üretiminde kullanılan teknikler arasındadır [11].

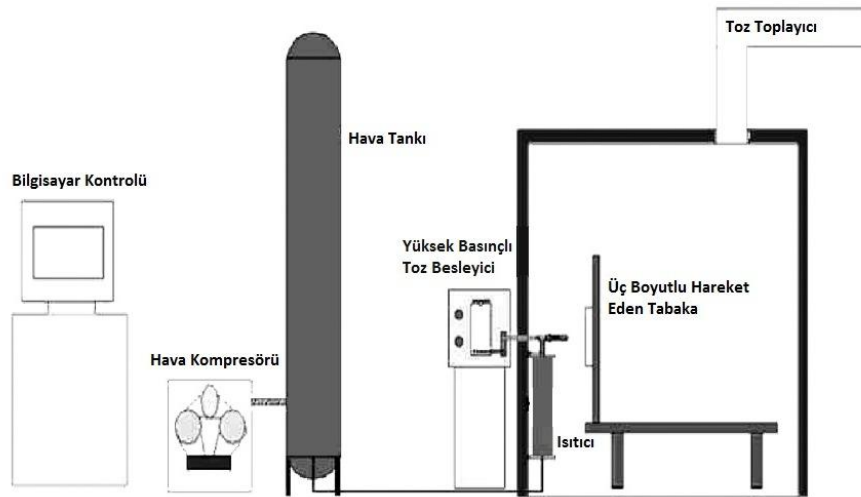
Bakırın yüzey özelliklerini geliştirmek için bir çok yöntem kullanılabilir. M.R. Bateni ve arkadaşlarının [9] yapmış olduğu çalışmada bakır yüzeyinde kutu sementasyon tekniği ile Ti-Cu ara metalik kaplaması elde edilmiştir. Yapılan kaplama işlemi sonucunda yüzey sertliğinin artırılması ile beraber aşınma direnci de artırılmıştır. İyon biriktirme tekniği ile bakırın yüzey sertliği ve aşınma direnci genel olarak iki kattan daha az olacak şekilde artırılabilir. K.W. Ng ve arkadaşları [12] lazer kaplama tekniğini kullanarak bakır altlık üzerine Mo kaplama gerçekleştirmişlerdir. Mo kaplama sayesinde altlık bakırdan yedi kat daha fazla sertliğe ve aşınma direncine sahip yüzey elde edilmiştir. Fiziksel buhar biriktirme tekniği ile bakır altlık üzerine yapılmış olan Ti/TiN, Nb/NbN ve CrN kaplamalar bulunmaktadır [13].

Termal püskürtme tekniklerinde metal matrisli kompozit kaplama işlemi genellikle içerisinde takviye elemanı olarak seramik partiküllerin bulunduğu metal tozlarının altlık yüzeyine püskürtülmesi suretiyle yapılmaktadır. Ticari termal püskürtme yöntemleri ile yapılan kaplama sırasında metal matrisin ergimesi nedeniyle seramik partiküllerin homojen dağılımı güçleşmekte olup, düşük poroziteli, altlığa iyi yapışmış kaplama elde etmek oldukça zordur. Bu zorluk takviye elemanı olarak karbürlerin kullanıldığı uygulamalarda daha da artmaktadır. Termal püskürtme tekniğinde kaplama ile altlık malzemesi arasında oluşan mekanik bağlanma en iyi ihtimalle 30 ile 50 MPa arasında olmaktadır [6].

Son yıllarda geliştirilmiş olan soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği termal püskürtme yöntemlerinde ortaya çıkan kaplamadaki boşluklar, oksitlenme ve düşük yapışma mukavemeti gibi problemlerin çözülmesi amacı ile geliştirilmiş bir tekniktir [2].

3.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemi

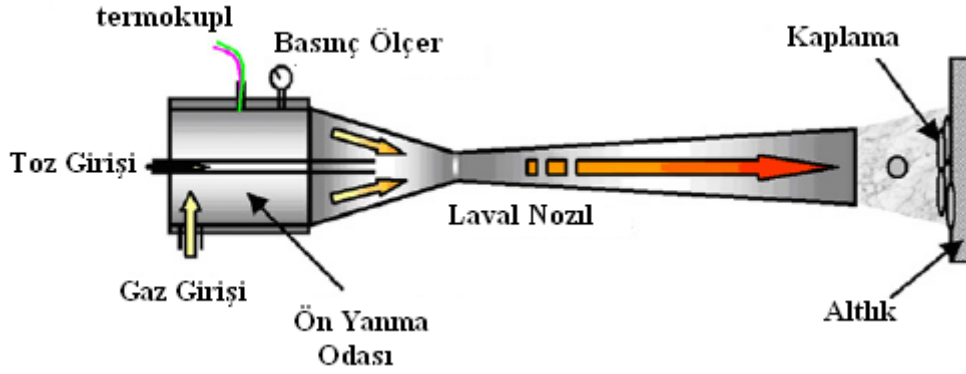
Soğuk dinamik gaz püskürtme (SDGP) tekniği 1980'lerin ortalarında Rusya'da Profesör Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından geliştirilmiş olan bir tekniktir. Rus bilim adamları bu teknik ile çok sayıda saf metalin, metal alaşımların, polimerlerin ve kompozitlerin farklı altlık malzemeleri üzerine kaplanmasını başarı ile gerçekleştirmişlerdir [14]. Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği için kullanılan ekipmanlar Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1: SGDP tekniği ekipmanlarının şematik gösterimi [15].

Katı haldeki tozların ergime olmaksızın malzeme yüzeyinde biriktirme işlemi olan soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde Şekil 3.2'de görüldüğü gibi küçük partikül boyutundaki (genellikle $<50\mu\text{m}$) tozlar sıkıştırılmış gaz ile sağlanan yüksek hıza sahip gaz akımına beslenir ve ses üstü hızlara ulaştırılır [15]. Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde yüksek hızda (300-1200 m/s) gaz akışı basınçlı gazın Şekil 3.2'de gösterilen Laval (daralan-genişleyen) tipi nozül içersinden geçirilmesi ile sağlanır. Başlangıçta ayrı bir gaz akımı ile taşınan tozlar nozüle beslenir. Nozüle beslenen tozlar nozüledeki ana gaz akımı ile hızlanır ve nozülü terk ettikten sonra altlık yüzeyine çarpar. Ses üstü hız (300-1200 m/s) ulaştırılan toz partiküllerin altlık üzerine çarpması sonucu plastik deformasyona uğrayarak altlık yüzeyine yapışması

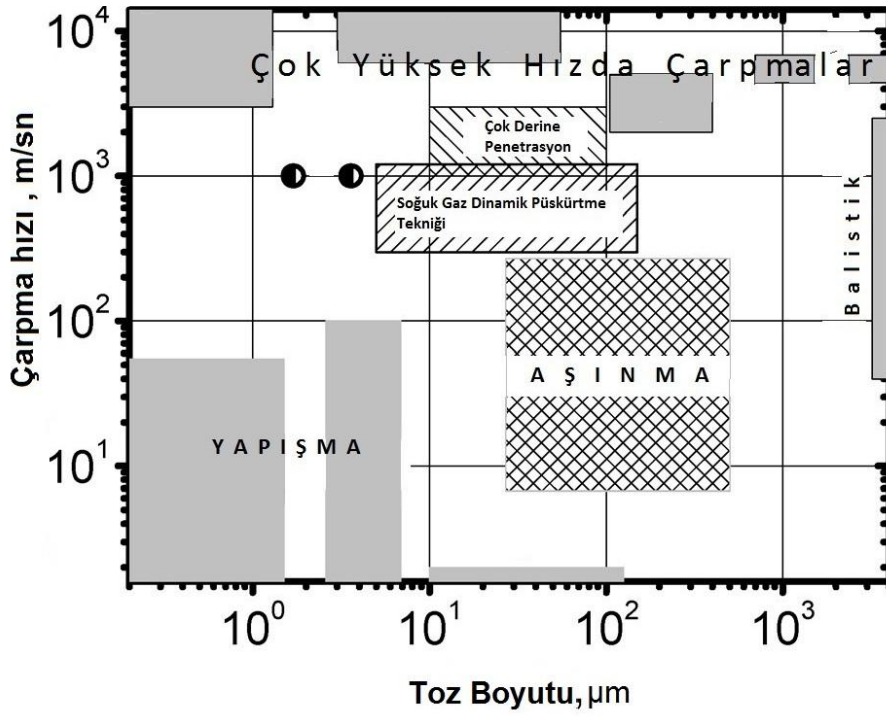
sağlanır (Şekil 3.2) [1,16,17]. Kaplama süresince tozlar altlık yerine yüzeye yapışan malzeme (kaplama) ile bağ oluşturmaya devam eder. Sonuç olarak altlık malzemesine iyi yapışan, homojen ve düşük poroziteli istenen kalınlıkta kaplama elde edilir.



Şekil 3.2: Laval tipi nozülün şematik gösterimi [17].

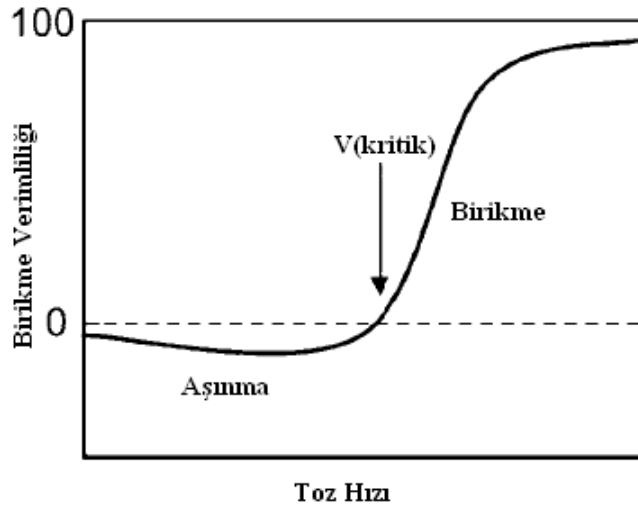
Küçük toz parçacıklarının tüm çarpışmaları plastik deformasyon sonucu yüzeyde birikme ile sonuçlanmaz. Küçük toz parçacığın katı bir yüzeye çarpması sırasında pek çok olay gözlemlenebilir. Bu olaylar düşük hızlarda yapışma veya erozyon, yüksek hızlarda balistik ve orta hızlarda soğuk püskürtme birikmesi olarak sınıflandırılabilir. Şekil 3.3 toz boyutu ile çarpma hızına bağlı olarak altlık yüzeyinde hangi mekanizmanın etkin olacağını göstermektedir. Şekil 3.3'den açıkça görüldüğü gibi yaklaşık 1200 m/s hıza ve 10-100 μm aralığında partikül boyutuna sahip tozlar altlık yüzeyine biriktirilebilir.

Tozun altlık yüzeyine çarpması sırasındaki hızı birikmenin yada erozyonun gerçekleşeceğini belirlemesi nedeniyle tozun çarpışma öncesindeki hızı çok önemlidir. Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde tozların altlık yüzeyine çarptığında plastik deformasyona uğrayarak altlık yüzeye tutunması için belirli bir hıza ulaşması gerekmektedir. Bu hız kritik hız olarak adlandırılmaktadır. Bir toz ve altlık ikilisi için kritik partikül hızı vardır ve ancak bu hıza veya daha yüksek hıza sahip tozlar yeteri kadar plastik deformasyona uğrar ve verimli bir şekilde altlık yüzeyine birikir. Diğer taraftan kritik hızdan daha düşük hıza sahip tozlar plastik deformasyona uğrayabilmek için yetersiz kinetik enerjiye sahiptir ve altlık yüzeyinde kumlama veya erozyona neden olur. Kritik hız kullandığımız toz malzemenin özelliklerine göre değişim göstermektedir.



Şekil 3.3: Toz boyutu ile çarpma hızının kaplama malzemesinin altlık üzerine çarpması sırasında gerçekleşecek olan mekanizmaya etkisi [19].

Kritik hız aynı zamanda kaplama veriminde ani artışın gözleendiği eşik hız olarak da tanımlanabilir. Kaplama verimi biriken kaplama ağırlığının püskürtülen tozun ağırlığına oranıdır. Şekil 3.4'den görüldüğü gibi kritik hızın altında birikme verimi sıfırdır ve ortalama toz hızı kritik bir değeri aştığında birikme düşük verimle başlar ve bu verim ortalama toz hızı arttıkça artar [20].



Şekil 3.4 : Birikme verimliliği ile toz hızı ilişkisi [20].

Bu ilişki iyi bir kaplama elde edilmesinde kullanılan tozların kritik hızlarının hesaplanmasına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir .

Proses parametreleri ve farklı malzeme özelliklerinin kritik hıza olan etkisi göz önünde bulundurularak elde edilmiş olan kritik hız denklemi Denklem 3.1 de verilmiştir [21].

$$V_{crit} = 667 - 0.014\rho + 0.08(T_m - T_R) + 10^{-7}\sigma_u - 0.4(T_i - T_R) \quad (3.1)$$

Burada; ρ toz yoğunluğu, T_m tozun ergime sıcaklığı, T_R referans sıcaklığı (genellikle oda sıcaklığı), σ_u tozun akma mukavemeti ve T_i tozun çarpma sıcaklığıdır.

Denklem 3.1 püskürtülen malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri ile proses parametrelerine (referans ve çarpma sıcaklıkları) bağlıdır. Ancak bazı araştırmacılar kritik hızın bu özelliklerle beraber püskürtülen tozun boyut dağılımı ile tozun ve altlığın yüzey oksit durumundan da etkilendiğini belirtmişlerdir [22,23].

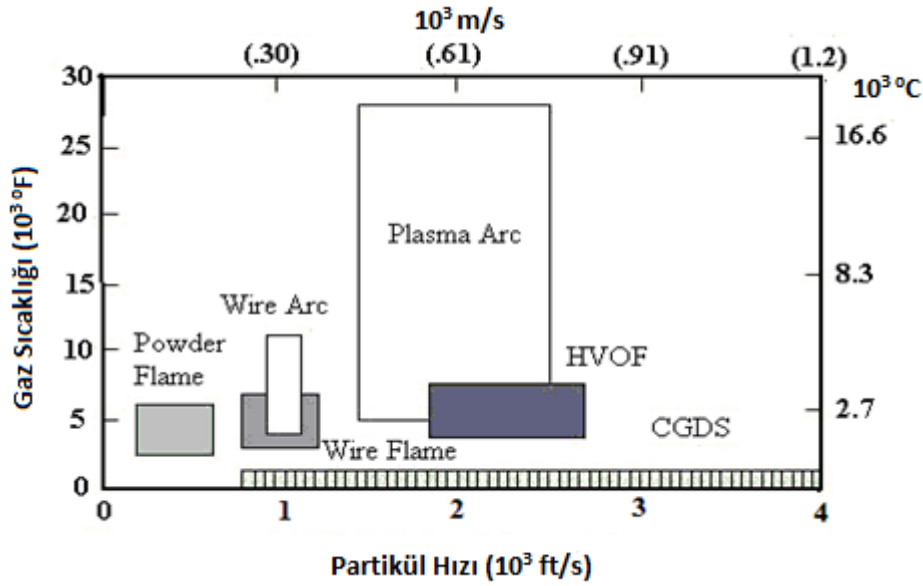
Yukarıda açıklandığı gibi soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde en önemli parametre püskürtülen tozun altlık yüzeyine çarpma öncesi hızıdır. Bu nedenle proses parametrelerinin püskürtülen tozun hızlanmasındaki rollerinin kavranması önem taşımaktadır.

3.1.1 Soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminin termal püskürtme yöntemleri ile karşılaştırılması

Bir çok açıdan SGDP yönteminde kullanılan tabanca , termal püskürtme yönteminde kullanılanla birbirine benzemektedir. Sıkıştırılmış gaz genellikle elektrik enerjisi kullanılarak 300-800°C sıcaklıkları civarına ısıtılır, ardından daralan genişleyen nozülde geçirilerek süpersonik gaz oluşturulur. Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kullanılan bu ısıtmanın amacı, termal püskürtme yönteminde olduğu gibi püskürtülen malzemeyi eritmek değildir. Önceden ısıtılan gaz , daralan genişleyen nozülün en küçük kesitindeki ses hızını arttırmakta ve bu da yüksek püskürtme hızlarını oluşturmakla birlikte, gaz kullanımını azaltmaktadır.[14]

Nozülde ilerleyen yüksek basınçtaki gaz, genişleyen kısıma geldiğinde daha büyük bir hacimle karşılaşmaktadır. Hacimin artması ile birlikte genişleyen gaz hızlıca soğumaktadır ve bazı durumlarda nozülün ucuna gelen gazın sıcaklığı oda sıcaklığının altına kadar düşmektedir. Şekil 3.5’de soğuk gaz dinamik püskürtme

yöntemi ile termal püskürtme yöntemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıklarının ve partikül hızlarının karşılaştırmaları verilmiştir. [24].



Şekil 3.5 : SGDP yöntemi ile termal püskürtme yöntemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıklarının ve partikül hızlarının karşılaştırılması

Toz hammaddeler işlem sırasında tabancanın orta merkezinden enjekte edilirler. Tabancanın içinde sıcak hava ile çok kısa bir süre temas eden toz partikülleri, kaplama yapılacak olan altlık malzemenin üzerine katı halde ulaşırlar. Bu karşılaştırmadan da açıkça görüldüğü üzere, SGDP yöntemiyle diğer termal püskürtme yöntemlerine göre düşük işlem sıcaklıkları ile birlikte, yüksek partikül hızları yakalanmıştır. Bu da SGDP yönteminin, yüzey özellikleri geliştirme yöntemleri arasındaki önemli yerini göstermektedir.

3.1.2 Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin avantajları

Çoğu metal, alaşım ve kompozit türleri için çok yüksek birikme verimlilik değerleri elde edilmiştir. Örneğin alüminyum, bakır ve bunların alaşımları için %95 in üzerinde birikme verimliliği elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki besleme stoğundaki oksijen miktarının en aza indirilmesi, tozlardaki gerilmelerin azaltılması, toz boyut dağılımının en uygun duruma getirilmesi ve püskürtme koşullarının en iyi şekilde ayarlanması durumunda çok yüksek oranda birikme verimliliğinin elde edilmesi mümkündür [14].

Bu kaplama tekniğinde taşıyıcı gaz püskürtülen tozların yeterince hızlandırılabilmesi amacı ile isteğe bağlı olarak ısıtılabilir. Bu sıcaklık püskürtülecek tozların erime sıcaklığının oldukça altında tutulmaktadır. Bu sayede tozlarda herhangi bir ergime oluşmadan tozlar kazanılan kinetik enerji sayesinde altlık üzerine yapıştırılmaktadır. Bu nedenle soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği ısıya duyarlı ve Ti gibi geleneksel tekniklerle kolaylıkla oksitlenebilen malzemeleri kaplamak için oldukça uygun bir tekniktir [25].

Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde püskürtülen tozların sahip oldukları kinetik enerjinin büyük kısmı plastik deformasyon için harcanırken küçük bir kısmı ısıya dönüşür. Mikro düzeyde açığa çıkan bu ısı kaplamada meydana gelen boşluk ve çatlamların doldurulmasını sağlamaktadır ve bu sayede yüksek yoğunluğa (<0.5 vol.% boşluk) sahip kaplamalar elde edilmektedir [14,26].

Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği ile yüksek yoğunluğa sahip kaplamalar elde edilmesine bağlı olarak ana malzemenin ısı ve elektrik iletkenliğinin %92'sinin üzerinde iletkenliğe sahip kaplamalar elde edilebilmektedir. Termal püskürtme ile elde edilen kaplamaların ana malzemenin iletkenliklerinin %40-63'üne sahip olduğu düşünüldüğünde, soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinin yüksek iletkenliğe sahip kaplamalar elde edebilmemiz için uygun bir yöntem olduğunu söyleyebiliriz .

Kaplama sırasında tozların altlık yüzeyine yapışması sırasında meydana gelen yüksek orandaki plastik deformasyon nedeni ile ana malzemenin daha sert kaplamalar elde edilmektedir [14].

3.1.3 Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin dezavantajları

Kompozitler püskürtülebilirken, saf seramikler ve bazı alaşımlar püskürtülemezler. İyi bir yapışma mukavemeti elde edebilmek için altlık malzemesinin sünekliği belirli bir değerin üstünde olmalıdır. Bu sebeple seramik altlıkların üzerine yapılan kaplama işlemlerindeki bağ kuvvetleri çok azdır. Bazı kaplama işlemlerinde helyum gazı kullanılması gerekebileceği için , üretim maliyetleri artmaktadır. Soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinde toz püskürtme tabancasının sadece gördüğü yerleri kaplaması nedeniyle karmaşık şekilli parçaların ve iç yüzeylerin kaplanması zordur [14].

3.2 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminde Kullanılan Parametreler

Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde elde edilebilecek toz hızı, püskürtülen tozun yoğunluğu, boyutu ile morfolojisi gibi karakteristik özelliklerine, ana gaz akım hızına dolayısıyla nozül geometresine, kullanılan gazın türüne, sıcaklığına ve basıncına bağlıdır.

3.2.1 Püskürtülen tozun özellikleri

Toz karakteristik özellikleri arasında toz boyutu ve toz yoğunluğu toz ağırlığını belirlediği için hızlanma davranışı üzerinde önemli etkisi vardır. Sabit çekim gücü altında ağır parçalar düşük hızlanma ivmesine ve düşük püskürtme hızına sahiptir. Küçük ve hafif tozların yüksek çarpma hızına sahip olması beklenmektedir [27,28]. Büyük tozlar için gerekli olan kritik çarpma hızı küçük tozlara göre daha azdır , çünkü büyük tozların sıcaklığı daha iyi muhafaza ettiği bilinmektedir. Kaplama verimliliği yüksek sıcaklıkta gaz kullanılarak artırılır bu da altlık yüzeyine çarpan tozun hızını arttırmaktadır. Ama gaz sıcaklığının artırılması ile birlikte metal tozların yüzey oksijen değeri artabilir. Bununla birlikte azot ve hava ile ekzotermik reaksiyona girme riski ortaya çıkmaktadır. Bu gibi gelişmeler partiküllerin sıcaklığını yükseltmektedirler. Yüksek sıcaklık değerleri metal tozların sünekliliğini artırırken, reaktif metallarda nitrür ve oksit tabakalarının oluşmasını da sağlamaktadır. Hava ve azot gibi çalışma gazları ile reaksiyona girebilecek Ti, Al, Si, Mg, Hf, Zr, Ta gibi metallerin kaplama işlemleri esnasında sıcaklık değerlerinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Bu sebeple başlangıç hammaddelerinin seçiminde toz boyutlarının ve toz cinsinin seçimi önemlidir.

3.2.2 Nozül geometrisi

Nozül geometrisinde en önemli nokta genişleme oranıdır. Genişleme oranı nozülün çıkış alanının (A) nozülün minimum kesit alanına (boğaz, A^*) oranı olarak tanımlanmakta ve nozülün Mach sayısını belirlemektedir. Mach sayısı gazın akış hızının (V) o gazdaki ses hızına (c) oranıdır (Denklem 3.2) [29].

$$\frac{A}{A^*} = M = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (3.2)$$

Bu denklemde γ gazın öz ısılarının oranını (C_p/C_v), R öz gaz sabitini (universal gaz sabitinin gazın molekül ağırlığına oranı) ve T gazın sıcaklığını göstermektedir.

Genel olarak diğer proses parametreleri (gaz basıncı, sıcaklığı, türü, püskürtülen tozun boyutu) sabit tutulduğunda teorik olarak ana gaz akım hızının sürekli artmasına rağmen belli bir genişleme oranına kadar genişleme oranı arttıkça püskürtülen tozun hızının arttığı ve maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Bu genişleme oranından daha yüksek genişleme oranlarında püskürtülen tozun yavaşladığı belirlenmiştir [24]. Bu durum tamamen nozülün kesit alanındaki gaz miktarı ile ilişkili olup kesit alanı arttıkça gaz yoğunluğu düşmekte ve dolayısıyla püskürtülen toz üzerine etki eden çekim kuvvetinin azalmasıyla açıklanmaktadır.

3.2.3 Gaz türü

Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde kullanılan gazlar proses içerisinde ses üstü hıza ulaşarak momentum transferi ile toz partiküllerin hızlandırılmasını sağlarlar. Gaz dinamik kanunlarından (denklem 3.2) aynı nozül içinden geçirilen gazın molekül ağırlığı düşürüldüğünde ve/veya öz ısı oranı (γ) arttırıldığında daha yüksek gaz akış hızları elde edildiği bilinmektedir. Bu noktada proses gazı olarak helyum seçildiğinde hava ve azota kıyasla daha yüksek gaz akış hızları elde edildiği literatürde bildirilmiştir [30].

Diğer taraftan kullanılan gazın reaktif olmaması tozların oksitlenmesi gibi problemlerin yaşanmaması açısından önemlidir. Ayrıca kullanılan gazın ucuz olması da diğer bir önemli husustur bunun nedeni ise işlem sırasında büyük miktarda gazın tüketilmesidir [14]. Bu teknikte genel olarak kullanılan beş farklı gaz türünün özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

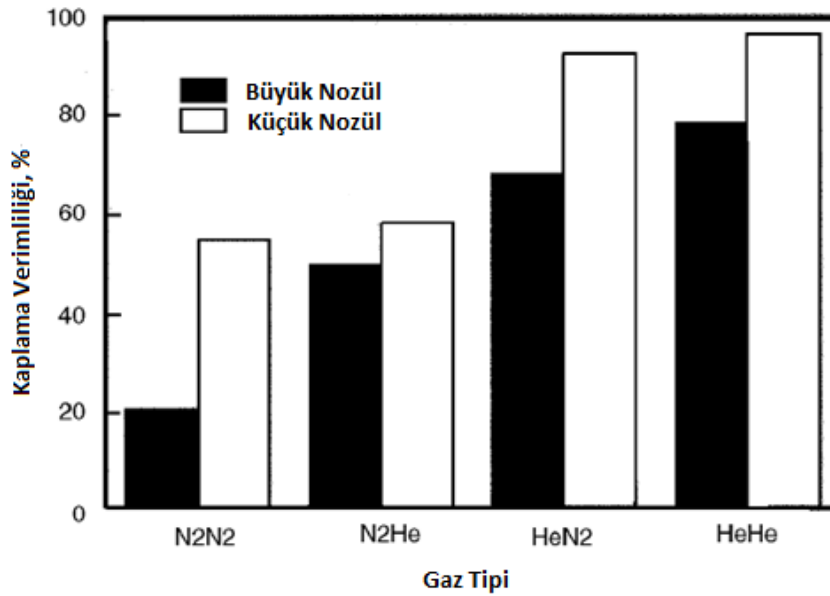
Çizelge 3.1 : Taşıyıcı gazların özellikleri [14].

Gaz	Ses Hızı (m/sn)	Yoğunluk (kg/m ³)	Soy ya da reaktif	Fiyat
Hava(80% N ₂ +20%O ₂)	343	1.225	Reaktif	Ucuz
Azot (N ₂)	349	1.185	Yarı reaktif	Ucuz
Hidrojen (H ₂)	1303	0.085	Reaktif	Pahalı
Argon (Ar)	319	1.69	Soy	Pahalı
Helyum (He)	989	0.168	Soy	Çok pahalı

Çizelge 3.1 incelendiğinde ses hızının hidrojen gazı içinde en yüksek değere ulaşması düşük molekül ağırlığından kaynaklanmaktadır. Fakat hidrojen patlama riski taşıyan bir gaz olduğu için kullanılması ancak çok ciddi güvenlik önlemleri alınması koşulu ile önerilmektedir. Fiyat olarak hidrojen azota kıyasla daha pahalıdır. Argon soy gazdır ve yüksek ağırlığa sahiptir, fakat hızlanabilme kabiliyeti düşüktür, ayrıca pahalıdır.

Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde genel olarak kullanılan iki gaz helyum ve azottur. Her ikisinde reaktif değildir. Helyum ve azot gazları kullanılarak yapılan kaplamalardaki verimlilik değişimini Şekil 3.6'da görmekteyiz. Hava, taşıyıcı gaz amaçlı kullanılan diğer gaz türüdür. Havanın hızı azota göre daha düşüktür, fakat hava mümkün olan en ucuz gazdır. Hava içinde bulunan oksijen sebebi ile tozlar oksitlenme riski taşımaktadır [14].

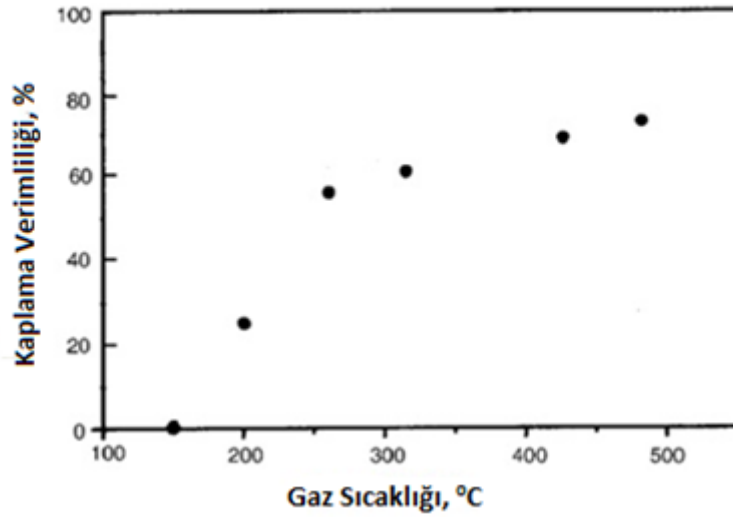
Proses gazı çeşitliliği ile kaplamanın verimliliğinin değişmesi yanında, kullanılan nozülün boyutları da kaplamanın özelliklerinde değişime sebep olmaktadır. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere küçük nozül kullanılarak yapılan kaplamaların verimliliği fazla olmaktadır. Bunun sebebi nozül alanının küçük olmasına bağlı olarak tozun hızının ve basıncının yüksek olmasıdır.



Şekil 3.6 : Proses gaz tipi ile kaplama verimliliği değişimi [31].

3.2.4 Gaz sıcaklığı

Denklem 3.2'den proses gaz sıcaklığı arttırıldığında gaz içersindeki ses hızının ve dolayısıyla sabit Mach değerinde gazın akış hızının artacağı görülmektedir. Smith ve arkadaşları [16] büyük toz boyutuna sahip alüminyum tozlarının farklı gaz giriş sıcaklıklarındaki hızlanma davranışlarını incelemiş ve proses gazının nozül giriş sıcaklığı arttıkça püskürtülen tozların nozül çıkışında daha yüksek hız değerlerine ulaştıklarını tespit etmişlerdir. Ancak proses gazı nozül içersinde sürekli hızlandığı için ısısının büyük bir kısmını kaybeder ve püskürtülen tozun ısınmasına neden olmamaktadır. Aynı zamanda püskürtülen tozlar nozül içinde çabukça hızlanır dolayısıyla sıcak proses gazı ile temas süresi kısıtlıdır ve bu süre püskürtülen tozun sıcaklığını arttırmak için yeterli değildir. Proses gazının sıcaklığının değişiminin tozların hızına olan etkisi , kaplamanın verimliliği ile doğru orantılıdır. Yapılan çalışmalarda değişik sıcaklıklar kullanılmış ve kaplama verimliliğinin değişimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi kullanılan proses gaz sıcaklığının artmasıyla birlikte, kaplama verimliliği artmıştır.



Şekil 3.7 : Proses gaz sıcaklığı ile kaplama verimliliği değişimi [31].

3.2.5 Gaz basıncı

Yüksek nozül giriş basıncı nozül boyunca yüksek basınç değerlerinin elde edilmesine ve dolayısıyla nozül içi ile dışı arasında yüksek basınç farkının oluşmasını sağlar. Bu yüksek basınç farkı daha yüksek gaz akış hızının ve yüksek püskürtme hızının elde edilmesine olanak tanır. Yüksek basınç kullanılarak yapılan işlemlerde , kaplama

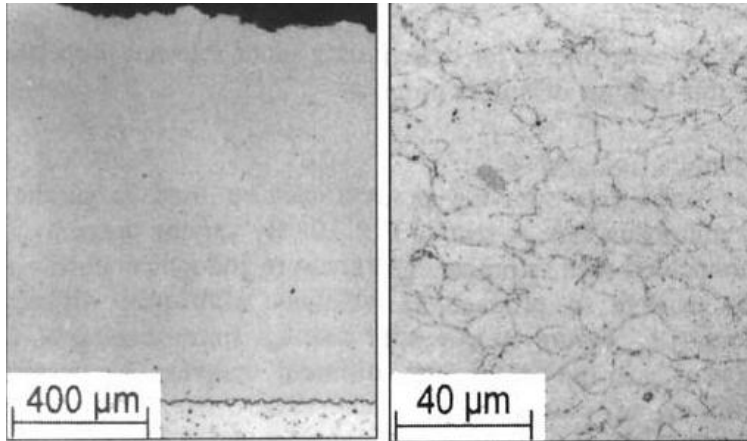
verimliliği artmaktadır. Bu da altlık üzerine püskürtülen tozun , altlık üzerinden daha az miktarda geri sektiğini göstermektedir. SGDP yönteminde püskürtülen tozun yüzeye çarpıp geri dönmesi, yüzeyde kumlama etkisi yaptığı bilinmektedir. Düşük basınç ile yapılan işlemlerde geri sekme işlemi fazla olduğundan , altlık üzerinde meydana gelen kumlama da fazla olacaktır. Bu da yüksek oranda deformasyonun meydana gelmesine sebep olarak, sünek kırılmalara yol açabilir. Yapılan çalışmalarda yüksek basınçla yapılan kaplamaların deformasyon sertleşmesine maruz kalarak sertlik değerlerin yüksek çıktığı görülmektedir [32].

3.3 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminin Uygulamaları

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi kullanarak çok çeşitli kaplamalar üretilmektedir. Bu kaplamalar saf metallere, demir ve demir dışı alaşımlarla, metal-seramik karışımı gibi kompozit malzemelerle yapılabilir. Günümüzde SGDP yöntemi ile elektrik/elektronik, uzay, otomotiv ve kimyasal sanayilerinde üretilen kaplamalar, uygulama alanına göre farklı özellikleri geliştirmek amacı ile kullanılabilirler [33].

3.3.1 Elektrik Uygulamaları

Bakır metali soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde en çok kullanılan malzemelerdendir. Şekil 3.8’de alüminyum üzerine kaplanmış bakır tozlarının mikroyapısı görülmektedir.



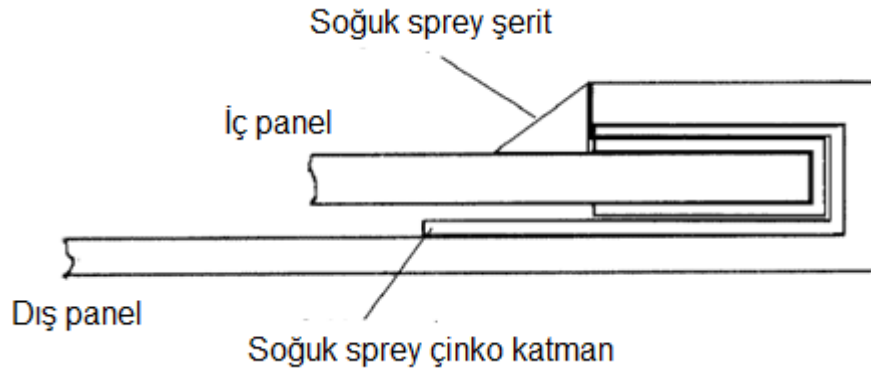
Şekil 3.8 : Alüminyum altlık üzerine SGDP yöntemi ile yapılan bakır kaplama görüntüsü[34].

Şekil 3.8’de kolayca görüldüğü gibi, kaplamanın yapısında çok az düzeyde boşluk bulunmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmada kaplamanın oksijen miktarı yaklaşık olarak

%0.1 düzeyindedir. Az miktarda olan oksijen miktarı ile düşük seviyedeki boşluk oranının birleşmesi, soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle yapılmış olan kaplamanın mükemmel elektrik özelliğine sahip olmasını sağlamaktadır. [34]

3.3.2 Korozyondan koruma uygulamaları

Otomotiv sektöründe yapılan üretimlerde kaynak veya diğer birleşme bölgeleri çok kolaylıkla korozyona uğrayabilirler. Bu gibi seçilmiş bölgeleri korozyon ataklarından korumak için soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin yararlı bir yaklaşım olduğu tespit edilmiştir. Örneğin araba kapılarının üretiminde kullanılan galvanizlenmiş metal saclardaki kaynak dikişleri genellikle korozyona uğramaya çok elverişlidirler. Çünkü koruyucu galvanizli yüzey montaj esnasında zarar görebilir. Bu gibi bölgeleri lokal olarak soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile kaplayabilir ve korozyondan koruyabiliriz. Anti-korozyon uygulamaları için Şekil 3.9’da görüldüğü üzere çinko tozları ile yapılan kaplamalar örnek verilebilir [35].



Şekil 3.9 : SGDP yöntemi ile yapılan korozyondan koruma uygulaması [35].

3.3.3 Aşınma direnci geliştirme uygulamaları

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile aşınma direnci düşük olan malzemeler üzerine sert tozlar kullanılarak kaplamalar yapılabilir. Değişik sert malzemeler kullanılarak, ve SGDP yöntemin parametrelerini değiştirerek, istenilen sertlik değerlerine ulaşılabilir ve aşınma testleri ile yapılan deneyler, diğer kaplama yöntemleri ile karşılaştırılabilir. İstenilen değerde sertlik sonuçlarının elde edilmesi, püskürtülen tozların hızlarına ve elde edilen kaplamaların yoğunluklarına bağlıdır. Aşınmaya mağruz kalacak olan kaplamalarda yüksek sıcaklığa dayanaklı ve yeterli sertliklerdeki malzemeler kullanılması, kaplamanın kalitesini arttıracaktır. Bu alanda yapılan Cr_2C_3 bazlı kaplamalar ile, soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin çok

amaçlı bir yöntem olduğu söylenebilir ve sertlik, aşınma direnci, sürtünme katsayısı gibi değerlerin, değişik kompozisyonlarla istenilen seviyelere çekilebileceği söylenebilir [14].

3.4 Literatürde bulunan benzer çalışmalar

C.Borchers ve arkadaşları [36] soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılacak bakır kaplamaların yüksek yoğunlukta, sıkı bağlara ve tatmin edici mühendislik performansına sahip olacağını hedefleyerek ürettikleri numuneleri soğuk haddelenmiş sac ve termal püskürtme yöntemleri ile yapılmış kaplamalar ile karşılaştırmışlardır. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamada altlık malzemesi olarak alüminyum kullanılmıştır. Kullanılan bakır tozlarının partikül boyutu 5 ile 20 μm arasında olup 25 bar nozül giriş gaz basıncında ve 300°C sıcaklık değerlerinde püskürtme yapılmıştır. Yüksek birikme verimi sağlamak için öngörülen kritik hız 570 m/sn'dir. Oda sıcaklığında yapılan öz direnç ölçümlerinde soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplama ve soğuk haddelenmiş bakır sac numunelerin değerleri birbirlerine yakın çıkmış olup, termal püskürtme ile yapılan kaplamanınkinden daha düşüktür. Kullanılan hammaddenin oksijen oranı ağırlıkça %0.07 olarak bildirilmiştir. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamadaki oksijen oranı ağırlıkça %0.08 değerinde iken, termal püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamada oksijen oranı ağırlıkça %0.4-0.6 arasında bulunmuştur.

M. Fukumoto ve arkadaşları [37] saf bakır tozlarını paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımı üzerine soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile kaplamışlardır. Bu çalışmada toz boyutu, proses gaz çeşidi, gaz hızı ve sıcaklığı, altlık malzemesinin sıcaklığı gibi parametrelerin yapışma davranışı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. DeneySEL çalışmalarda 5 μm , 10 μm ve 15 μm ortalama boyutlara sahip saf bakır tozları kullanılmıştır. Çalışma gazı olarak hava ve helyum kullanılmış olup gaz basıncı 1MPa'a kadar değişik değerlerde ayarlanmıştır. Kaplamalar oda sıcaklığındaki ve 673K'e kadar ısıtılmış altlık malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplama sonucunda altlık malzemesi yüzeyinde yarım küresel şekile sahip bakır tozları görülmüştür. Bakır tozların altlık malzemesine çarpması sonucu plastik deformasyona uğramaları sayesinde oluşan bu şekiller, deformasyon sertleşmesi sebebiyle sertlik artışını göstermektedir. Bakır toz hızının, çalışma gazının

sıcaklığından ziyade, çalışma gazının basıncından etkilendiği belirtilmiştir. Artan gaz basıncının tozların yüzeyde birikmesinde olumlu bir etki yaptığı saptanmıştır. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamada, altlık sıcaklığın artırılması, altlık yüzeyinde oluşan ilk kaplama katmanının daha yüksek birikme verimi ile oluştuğunu göstermektedir.

Peter C. King ve arkadaşları [38] soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapacakları kaplamalarda kullanılacak olan altlık malzemesinin sertliği ile yapışma özelliği arasındaki ilişkiyi görmek için bakır tozlarını ticari saflıktaki alüminyum (CP) ve 7050 alaşımının üzerine püskürtmüşlerdir. Karşılaştırma olarak 7050 alaşımının seçilmesi, bu malzemenin daha mukavemetli, homojen bir mikroyapıda olması ve intermetalik partiküllerin daha düşük konsantrasyonda bulunmasından dolayıdır. Soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminde kullanılan bakır tozları küresel bir morfolojiye sahip olup, ortalama toz boyutu 15.2 μm olarak bildirilmiştir. Kaplama çalışmalarında nozül giriş basıncı 25 bar olan azot kullanılmıştır. Soğuk dinamik gaz püskürtme sisteminde kullanılan nozül ucunun altlığa uzaklığı 20 mm seçilirken, tabancanın hareket hızı 0.05 m/sn olarak belirlenmiştir. Gazın nozül giriş sıcaklığı 200°C, 400°C, 600°C olarak seçilmiştir. Bu sıcaklık değerleri arttıkça, bakır tozlarının hızlarında da artış gözlenmiştir. Alüminyum 7050'nin üzerine yapılan kaplamalarda, ticari saflıktaki alüminyuma göre daha bölgesel bir deformasyon karakteristiği görülmüş olup, daha yüksek arayüzey sıcaklıkları elde edilmiştir. Birikme verimi, parçacıkların yüzeye gömülmesi ile açıklanarak daha yumuşak olan ticari saflıktaki alüminyumda 7050 alaşımına göre daha fazla olmuştur. Sonuç olarak sertliğin ve sıcaklığın soğuk dinamik gaz püskürtme sistemi kullanılarak yapılan kaplamalar üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Wen-Ya Li ve arkadaşları [39] çelik altlık üzerine bakır tozlarını soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile kaplamışlardır. Bu çalışmada bakır tozların birikme veriminin kullanılan gazın sıcaklığına ve yüzey oksitlenmesine bağımlılığı ile yüzey oksit seviyesinin arayüzey mikroyapısına ve yapışma mukavemetine etkisi incelenmiştir. Kullanılan gazın sıcaklık değişimi ve püskürtülen bakır tozunun ortalama hızının birikme üzerindeki etkilerinin sonuçları kullanılan çeşitli gazlarla birlikte verilmiştir. Düzenlenen deneylerde kullanılan bakır tozlarının ortalama boyutu 20.5 μm ve bu tozların oksijen içeriği ağırlıkça %0.04 ve %0.38 olarak bildirilmiştir. Hızlandırıcı gaz olarak helyum ve azot gazları kullanılmıştır. Soğuk dinamik gaz püskürtme

sisteminde kullanılan nozül ucunun numuneye uzaklığı 20 mm seçilirken, tabancanın hareket hızı 80 mm/sn olarak ayarlanmıştır. Artan gaz ve parçacık sıcaklığının birikme verimini arttırdığı buna karşılık başlangıçta kullanılan tozun oksijen miktarındaki artışın birikme verimini düşürdüğü tespit edilmiştir. Benzer mikroyapı ve mikrosertlik değerlerine sahip olmalarına rağmen, yüksek oksijen içeriğine sahip olan toz ile yapılan kaplamada bakır tozlarının arayüzeyinde daha çok oksit inklüzyonları görüldüğü bildirilmiştir. Başlangıç tozundaki yüksek oksijen içeriğinin yapışma mukavemetini kayda değer miktarda düşürdüğü saptanmıştır. Bunun sebebi olarak bol miktardaki oksit inklüzyonlar gösterilmiştir ki bu yapılar metallerin etkin bir bağ yapma yeteneğini engellemektedir. Bu gelişmelere rağmen biriken kaplamanın kırılma davranışı değişmemiştir.

Hyun-Ki Kang ve arkadaşları [26] topaklanmış tungsten ve bakır kompozit tozunu yumuşak çelik altlığın üzerine plazma püskürtme ve soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemlerini kullanarak kaplamışlardır. Toz karışımları hazırlanırken tungsten toz boyutu 1 μm ve bakır toz boyutu 45 μm altı olacak şekilde seçilmiştir. Her iki tozun da saflığı %99.9 olarak belirlenmiş olup tozlar ağırlıkça %25 bakır ve %75 tungsten olarak karıştırılmıştır. Tozlar kaplamada kullanılmadan önce bilyalı öğütücüde 20 saat boyunca alaşımlandırılmıştır. Yapılan mikroyapı incelemelerinde soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği ile üretilen kaplamanın plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaya göre daha az porozite içerdiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği ile üretilen kaplamada bakırın oksitlenmesi gözlenmemiştir. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamanın sonucunda ağırlıkça %40 tungsten kaybı olmuştur. Bu kaybın nedeni ise yetersiz plastik deformasyon olarak gösterilmiştir. Tungstence zengin olan bölgelerde çok fazla boşluk görülmüştür. Kaplamadaki tungsten miktarı artan proses gaz sıcaklığı ile artmıştır. Bu artış artan toz püskürtme hızı ile açıklanmıştır.

J.S. Kim ve arkadaşları [40] titanyum diborür ve bakırdan oluşan nanokompozit tozu kullanarak, bakır altlığın üzerine soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile kaplama yapmışlardır. Deneylerde kullanılan nanokompozit tozlar 40 μm 'un altında olacak şekilde elenerek hazırlanmıştır. Üretim esnasında kullanılan titanyum diborür 50–100 nm boyutlarındadır. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamanın yapımı sırasında çalışma gazı olarak hava kullanılmış ve havanın nozül giriş basıncı 1.6 MPa, sıcaklığı ise 400 °C olarak ayarlanmıştır. Kaplamada kullanılan tozlar bakır

altlık malzemesi üzerine 450–580 m/s hızla gönderilmiş olup bu hız nanokompozit yapıdaki tozların büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Nanokompozit yapıdaki tozun içeriği hacimce %43 TiB₂ ve kalanı Cu olarak belirlenmiştir. Seramik içeriğin yüksek ve fazlar arasında büyük plastisite farkları olmasına rağmen kaplama tamamen yoğun bir yapıda oluşmuştur. Kaplamanın Vickers sertlik değeri 378HV olarak ölçülmüş olup, bu değer Vickers sertlik değeri 150HV olan soğuk dinamik gaz püskürtme ile üretilen saf bakır kaplama ile karşılaştırılmasıyla, nano tane boyutlarına sahip titanyum diborür yapısının varlığının kaplamanın sertliğini ne kadar arttırdığı gösterilmiştir.

A. Sova ve arkadaşları [41] daha önce kumlanmış olan alüminyum altlık üzerine soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemini kullanarak metal-seramik karışımı olan tozları püskürterek kaplama işlemi yapmışlardır. Yapılan çalışmada seramik toz hızlarının, metal-seramik kaplama oluşumundaki ve bu kaplamanın özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Metal-seramik karışımında metal olarak bakır ve alüminyum kullanılırken, seramik olarak ise değişik partikül boyutlarına sahip alümina ve silisyum karbür kullanılmıştır. Değişik nozül geometrileri kullanılarak farklı püskürtme hızları elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan alüminyum tozunun ortalama boyutu 25 µm, bakır tozunun ortalama boyutu ise 39 µm olarak verilmiştir. Metal-seramik karışımında kullanılan seramik tozlardan Al₂O₃ tozlarının ortalama boyutları 19 µm ve 127 µm, SiC tozlarının ortalama boyutları ise 25 µm ve 135 µm olarak bildirilmiştir. Çalışma gazı olarak tüm deneylerde azot kullanılmıştır. Soğuk dinamik gaz püskürtme sisteminde kullanılan nozül ucunun altlığa uzaklığı 20 mm seçilmiştir. Seramik toz hızlarının kaplamanın oluşumundaki öneminin görülmüş olduğu bu çalışmada, kaplamaların oluşmasında sermet karışımının içindeki seramik tozların en uygun seviyeye hızlandırılması gerektiği bildirilmiştir. Az seviyede hızlandırılma yapılırsa seramik parçaların yüzeyden geri döndüğü belirtilmiştir. Püskürtülen tozların altlık üzerine nüfus etmesi için gerekli olan hıza ulaşabilmesinin sağlanmasında kaba taneli seramik parçacıklar daha uzun nozül içersinde hızlandırılmalıdır. Sermet kaplamanın mikro sertliği kaplamadaki seramik oranına bağlı olmakla birlikte, seramik partiküllerin altlığa çarpma hızı ile de doğru orantılı olduğu bildirilmiştir. Mikro sertlik ölçümlerinde, kaba taneleri içeren sermet kaplamaların sertlikleri, ince taneli sermet kaplamaların sertliklerinden daha yüksek çıkmıştır.

Heli Koivuluoto ve Petri Vuoristo [42] soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile bakır ve bakır alümina karışımını çelik altlığın üzerine kaplamışlardır. Bu çalışmanın amacı değişik bakır parçacık türlerinin ve farklı kompozisyonlarda eklenen alüminanın elde edilecek kaplamanın mikroyapısı, kırılma davranışı, yoğunluğu, sertliği ve yapışma mukavemeti üzerindeki etkilerini saptamaktır. Bakır tozları küresel ve dendritik olarak kullanılırken, alumina tozları ise %0, 10, 30 ve 50 gibi değişik hacim oranlarında eklenmiştir. Bu örneklerle ek olarak bir ticari toz karışımı ile referans kaplaması da yapılmıştır. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamalarda kullanılan küresel bakır tozlarının ortalama boyutu 25 µm mertebelerinde olurken, dendritik bakır tozların boyutu 63 µm'den küçük olduğu bildirilmiştir. Referans olarak kullanılan bakır alümina toz karışımında bakır toz boyutu 15 µm olarak belirtilirken alümina oranının hacimce %50 olduğu morfoloji resimlerinin analizi ile belirlenmiştir. Kaplama esnasında çalışma gazı olarak 6 bar basınç değerine sahip hava kullanılmıştır. Kullanılan gaz 540°C sıcaklığa ısıtılmıştır. Tozların besleme hızları 8 kademeli kontrol düğmesi ile ayarlanmış olup, ticari karışım tozu ile dendritik bakırlı karışım için 4.5 seviyesinde ve küresel bakırlı karışımlarda ise 5-7 seviyeleri arasında seçilmiştir. Soğuk dinamik gaz püskürtme sisteminde kullanılan nozül ucunun altlığa uzaklığı tüm deneyler için 10 mm seçilirken, tabancanın hareket hızı 5 ve 7.4 m/dak olarak belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda sert partiküllerin eklenmesi kaplamanın kalitesinin arttırmıştır. Bakır tozları açısından bakıldığında, küresel bakır tozları ile hazırlanan karışımlar ile elde edilen kaplamaların yapılarında daha az boşluğa rastlanmıştır. Boşluk miktarı kaplama yapılmadan önce hazırlanan hammadde içinde bulunan alümina oranı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Yüksek miktarlardaki alümina, kaplamayı daha çok soğuk işleme maruz bırakmakta ve bunun sayesinde sertlik değerleri artmaktadır. Öte yandan alüminanın varlığı altlığın yüzeyini temizlemekte ve daha güçlü bağ kuvvetleri oluşmaktadır. Bunun yanında sertlik ve bağ kuvveti değerlerinin küresel yapılı bakırlarla oluşturulan kaplamalarda daha yüksek olmasının sebebi ise küresel parçacıkların daha fazla plastik deformasyona uğramasıdır.

P. Sudharshan Phani ve arkadaşları [43] nano boyutlardaki bakır ve alümina tozları ile bakır altlık üzerine soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemini kullanarak kaplama yapmışlardır. Bu kaplama ile karşılaştırılmak üzere sadece bakır tozu kullanılarak bir kaplama çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Genel olarak ısıtılma sıcaklığının

boşluk oluşumu, kaplamadaki tane boyutu, mikrosertlik değeri ve elektrik iletkenliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamada kullanılan alümina ve bakır tozları mekanik olarak öğütülmüş ve 22-45 µm aralığında hammadde üretilmiştir. Karşılaştırma çalışması için kullanılan bakır tozunun boyutu ise 10-45 µm aralığındadır. Kaplama parametreleri olarak nozül ucunun altlığı uzaklığı 15 mm ve besleme hızı 10 g/dakika olarak seçilmiştir. Kaplama işlemleri 2 MPa basınçta yapılmıştır. Deneylerdeki ısıtma sıcaklıkları 300°C , 600°C , 950°C olarak seçilmiştir. Isıtma sıcaklığının artması ile birlikte, tane boyutu her iki kaplama için de artış göstermiştir. Boşluk oranındaki değişim bakır alümina kaplamasında değişmezken, bakır kaplamada keskin bir düşüş yaşanmıştır. İletkenlik değeri ısıtma sıcaklığı ile birlikte artış göstermiş olup bakır kaplamada 300°C'den sonra sabit kalmıştır. Isıtma sıcaklığı sertlik değerinde her iki numune içinde düşüşe neden olup sadece bakır kaplamada bu düşüş daha etkili görülmüştür.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmalarımızın amacı bakır altlık üzerine, bakır matrisli seramik partikül takviyeli kompozit kaplayabilmektir. Deneysel çalışmalarda altlık malzeme olarak punto kaynak uygulamalarında elektrot görevi gören bakır metali kullanılmıştır. Kaplama çalışmalarında kullanılmak üzere Alfa Aesar firmasından temin edilen %99.9 saflığa ve 10 µm ortalama partikül boyutuna sahip bakır tozları ile %99.99 saflığa ve 11 µm ortalama partikül boyutuna sahip Al_2O_3 tozları seçilmiştir.

4.1 SGDP Yöntemi ile Uygun Parametrelerin Seçilmesi için Yapılan Çalışmalar

4.1.1 Kaplama işlemi

Kaplama çalışmalarında kullanılan toz karışımının hazırlanması için tozlar öncelikle hacimce %25 Al_2O_3 içerecek şekilde hazırlanmıştır. Kaplama işlemi öncesi yüzey temizliği amacıyla altlık malzeme yüzeyleri kısa süreli zımparadan geçirilip 5 dakika ultrasonik temizleyicide alkol içerisinde bekletilmiştir. Toz karışımı RUSONIC marka soğuk gaz dinamik püskürtme cihazı ile bakır altlığa püskürtülmüştür. Hızlandırıcı gaz olarak 6 bar nozül giriş basıncına sahip hava kullanılmıştır. Kaplama çalışmalarında nozül çıkışı ile numune arası mesafe 10 mm olarak ayarlanmış ve sabit tutulmuştur. Bakır altlık servo motor kontrollü bir tutucuya bağlanmış ve kaplama işlemleri 12 mm'lik bir çizgi boyunca farklı hız değerlerinde (1, 2.5, 5 ve 7.5 mm/s) ve paso sayılarında (1,2 ve 4) gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemlerinde cihaz üzerinde bulunan 8 kademeli toz besleme hızlarından 2. kademe kullanılmıştır. Böylelikle işlem hızının ve paso sayısının kaplama kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

4.1.2 Kaplanmış yüzeylerin yapılarını inceleme deneyleri

SGDP yöntemi ile üretilen numuneler, kaplanan yüzeye dik yöndeki kesit boyunca Buehler Isomet hassas kesici ile kesilerek sıcak bakalite alınmıştır. 500, 800, 1000, 1200 gritlik zımpara kâğıtları ile zımparalanan numuneler 3µm'lik elmas

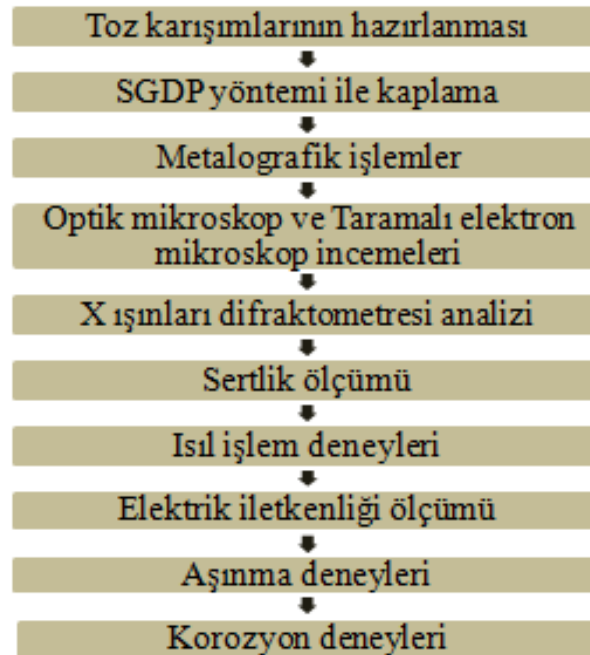
süspansiyon ile MD Mol çulha kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numunelerin kesit mikroyapıları Leica DM 6000M optik mikroskobu ve Hitachi TM1000 masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Mikroyapı fotoğrafları kullanılarak kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve bu değerler uygun parametrelerin seçiminde değişken olarak kullanılmıştır.

4.1.3 Sertlik deneyleri

Kaplanmış numunelerin yüzey sertlikleri 25 gram yük altında (HV_{0.025}) 10 saniye uygulama süresiyle, elmas piramit batıcı uç kullanılarak Shimadzu HVM mikro sertlik cihazında ölçülmüştür. Numune başına değişik bölgelerden yaklaşık 15 ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak bir sertlik değeri sonucu elde edilmiştir.

4.2 Uygun Parametreler Seçildikten Sonra Yapılan Çalışmalar

Elde edilen sertlik değerleri , kaplamanın yüzey ile yapışma kalitesi , kaplamadaki boşluk ve çatlak gibi olumsuzluklar , kaplama üzerindeki oksitlenme ve kaplamanın kalınlık değerleri göz önünde bulundurularak SGDP yöntemi için uygun parametreler seçilmiş ve bu parametreler kullanılarak toz karışımları altlık malzeme yüzeyine tamamen kaplanıp karakterize edilmiştir. Uygun parametrelerin seçilmesinden sonra deneysel çalışmalarda izlenen yol Şekil 4.1 de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Deneysel akım şeması.

4.2.1 Kaplama işlemi

Hacimce %25 Al_2O_3 ve %75 Cu seçilerek hazırlanan toz karışımları bakır altlık üzerine SGDP yöntemi ile püskürtülmüştür. Kaplama işleminde hızlandırıcı gaz olarak 6 bar nozül giriş basıncına sahip hava kullanılmıştır. Nozül çıkışı ile numune arası mesafe 10 mm olarak ayarlanmış ve sabit tutulmuştur. Bakır altlık servo motor kontrollü bir tutucuya bağlanmış ve kaplama işlemleri tüm yüzeye uygulanmıştır. Kaplama işlemlerinde cihaz üzerinde bulunan 8 kademeli toz besleme hızlarından 2. kademe kullanılmış olup, seçilen parametreler Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizege 4.1 : SGDP yönteminde kullanılan parametreler.

SGDP yönteminde kullanılan parametreler	
Çalışma Gazı (Hava)	6 bar
Tabanca-Numune Arası Mesafe	10 mm
Kaplama Hızı	5 mm/sn
Paso Sayısı	4
Besleme Hızı	2/8 kademe

4.2.1.1 Değişik seramik oranındaki kaplama işlemleri

Yapılan bu çalışmalara ek olarak toz karışımı içerisindeki seramik miktarı hacimce %12.5 olarak değiştirilip aynı parametreler kullanılarak kaplama işlemi uygulanmış ve kaplama verimliliğinin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin seramik miktarı ile değişimi incelenmiştir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda kompozit yapı içerisindeki seramik oranının belirlenmesi kararlaştırılmıştır.

Püskürtülen tozların içerisinde seramik malzeme olmadığında yapılan kaplamaların verimliliğini değerlendirmek amacıyla bakır altlık malzemesinin üzerine içerisinde seramik bulunmayan %100 bakır tozları püskürtülmüş ve sonuçlar yapılan karakterizasyon işlemleri ile analiz edilmiştir. Bu çalışma 7.5mm/s hızda ve 4 paso sayısı değerlerinde yapılmıştır. Proses parametrelerinde sadece hız değerinde farklılık gösteren bu çalışmada bakır tozlarının seramik malzeme olmadan da soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle kaplanabilirliği araştırılmıştır.

4.2.2 Kaplanmış yüzeylerin yapılarının incelemesi

SGDP yöntemi ile üretilen numuneler, kaplanan yüzeye dik yöndeki kesit boyunca Buehler Isomet hassas kesici ile kesilerek bakalite alınmıştır. 500, 800, 1000, 1200 gritlik zımpara kâğıtları ile zımparalanan numuneler 3µm'lik elmas süspansiyon ile MD Mol çuha kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numunelerin kesit mikroyapıları Leica DM 6000M optik mikroskobu ve Hitachi TM1000 masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Mikroyapı fotoğrafları kullanılarak kaplamaların içerisindeki gerçek seramik miktarları Clemex görüntü analiz etme programı ile ölçülmüştür.

Kaplamaların yapılarındaki fazlar Bruker D8 Advance X ışınları difraktometresinde Cu K α ışınları altında 20°-100° tarama aralığında analiz edilmiştir.

4.2.3 Sertlik deneyleri

Hacimce %25, %12.5 seramik karışımı ve saf bakır tozlarıyla üretilmiş kaplama numunelerin yüzey sertlikleri 25 gram yük altında(HV_{0.025}) 10 saniye uygulama süresiyle, elmas piramit batıcı uç kullanılarak Shimadzu HVM mikrosertlik cihazında ölçülmüştür. Numune başına değişik bölgelerden yaklaşık 20 ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak bir sertlik değeri sonucu elde edilmiştir.

4.2.4 Isıl işlem deneyleri

Değişik seramik oranlarındaki bakır tozları karışımları ve saf bakır tozları ile yapılan kaplamalar Nabertherm kutu tipi fırında argon atmosferi kullanılarak 300 ve 600°C sıcaklıklarında ısıtılma işlemine tabii tutulmuşlardır. Isıl işlem deneylerinde istenilen sıcaklığa 5°C/dakika ısıtma hızı ile çıkılmış , 1 saat bu sıcaklıkta bekletildikten sonra 20°C/dakika hız değeri kullanılarak fırının içinde soğutma yapılmıştır. Yapılan ısıl işlem deneyleri sonrasında aynı metalografik işlemlere tabii tutulan numunelerin , kaplama yönüne dik olan kesitleri kesilip bakalite alındıktan sonra sertlik değerleri ölçülmüştür. Toplamda ısıl işlemlili ve işlemsiz olmak üzere 9 adet numune ile diğer karakterizasyon işlemlerine başlanmıştır.

4.2.5 Elektrik iletkenliği deneyleri

Isıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış olan değişik oranlarda seramik toz içeren bakır tozu karışımları ve saf bakır tozları ile yapılan kaplama numunelerinin yüzeyinden Hocking AutoSigma 3000 Electrical Conductivity Meter cihazı ile numune başına 10 adet olmak üzere iletkenlik değerleri alınmış ve bu değerlerin ortalaması kullanılarak kaplamadaki seramik miktarının ve ısıl işlemin kaplamanın elektrik iletkenliği üzerine etkileri incelenmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

4.2.6 Aşınma deneyleri

Isıl işlemli ve işlemsiz numunelerinin aşınma deneyleri, Tribotech aşınma test cihazında, 6mm çapında çelik bilya kullanılarak kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Cihazın uygun bir şekilde çalışması için bir kaç ön deney yapılarak aşınma deney parametreleri belirlenmiştir. Bu ön çalışmalar sonucunda 4N yükte en uygun deneylerin yapılabileceği bulunmuştur. Diğer deney parametleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Deney süresince, sürtünme katsayısı değerleri test cihazı ile grafik haline getirilmiş ve her test sonrası, çelik bilyanın üzerinde oluşan izler ilk haliyle ve bilya etil alkol ile temizlendikten sonra optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Aynı deneyler alümina top ile de denenmiş fakat herhangi bir aşınma sonucu elde edilememiştir.

Çizelge 4.2 : Aşınma deneyi parametreleri.

Aşınma deneyi parametreleri	
Uygulanan Yük	4 N
Toplam Kayma Mesafesi	50 m
Aşınma İzi Uzunluğu	5 mm
Kayma Hızı	10 mm/sn
Çalışma Sıcaklığı	23±2 °C
Çalışma Ortamı Nem Oranı	% 31±2

Aşınma deneyleri yapıldıktan sonra Veeco Dektak 6M profilometresi kullanılarak her bir numune için 5 adet aşınma izi topografik profilleri çıkarılmıştır. Profillerden aşınma iz alanları hesaplanarak her bir aşınma izi için ortalama alan değerleri

belirlenmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurularak numunelerin aşınma davranışları gözlemlenmiştir. Son olarak numune yüzeylerinde oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu mikroskoba bağlı olan EDS ile incelenmiş ve ne tür bir aşınma davranışının elde edildiği aşınma izi fotoğrafları ile yorumlanmıştır.

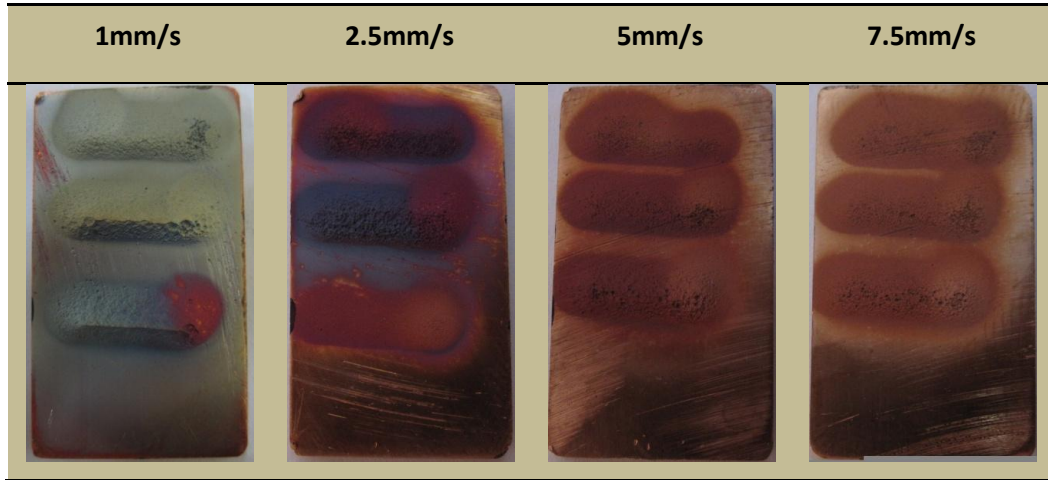
4.2.7 Korozyon deneyleri

Hacimce değişik oranlarda seramik toz içeren bakır kaplamaların ısıtılma işlemi ugramış veya ugramamış numuneleri korozyon deneylerini gerçekleştirmek için öncelikle numuneler bakır tel ile lehimlenmiştir. Daha sonra lehimli bölge de içeride kalacak şekilde soğuk bakalit kullanılarak kalıba alınan numunelerin %3.5 NaCl tuzlu su çözeltisine maruz kalacak yüzeyleri 0.25cm^2 olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin korozyon davranışları elektrokimyasal metot ile değerlendirilmiştir. Anodik potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Gamry PC4/750 potansiyostat/galvanostat model P600 sisteminde, OCP-0.8'den OCP+1.2'ye kadar 1 mV/s tarama hızı ile kaydedilmiştir. Elde edilen grafiklerden numunelerin korozyon davranışları yorumlanmıştır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Uygun Parametrelerin Seçilmesi için Yapılan Çalışmaların Sonuçları

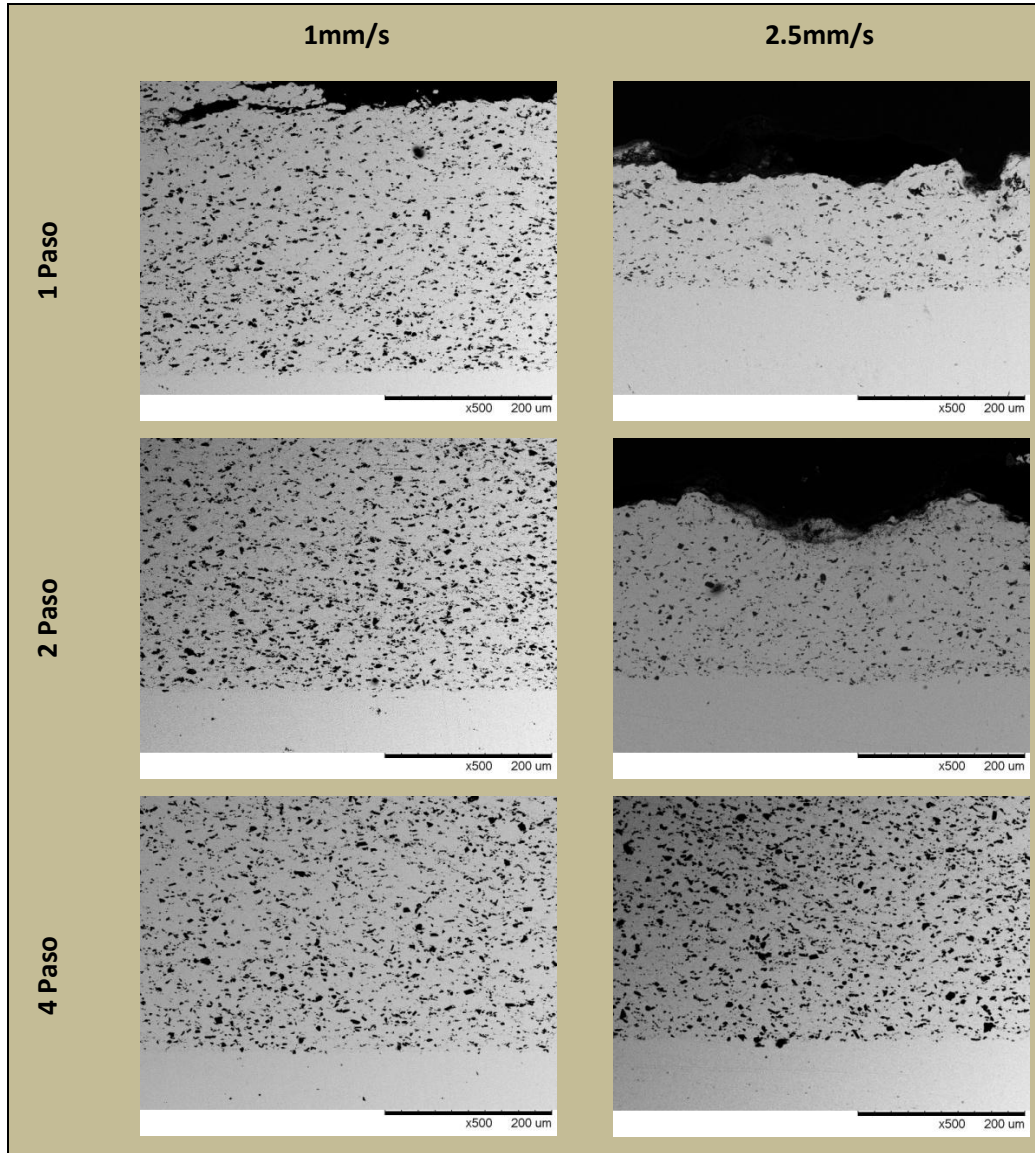
Çalışmalarımızın en başında kaplama işlemleri 15 mm'lik bir çizgi boyunca farklı hız değerlerinde (1, 2.5, 5 ve 7.5 mm/s) ve paso sayılarında (1, 2 ve 4) gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu ilk çalışmaların makro fotoğrafları şekil 5.1'de verilmiştir. Numuneler yukarıdan aşağıya doğru 1, 2, 4 paso değerlerinde kaplanmışlardır.



Şekil 5.1 : Hacimce %25 Al₂O₃ içeren toz karışımı ile farklı hızlarda yapılmış kaplamaların makro fotoğrafları.

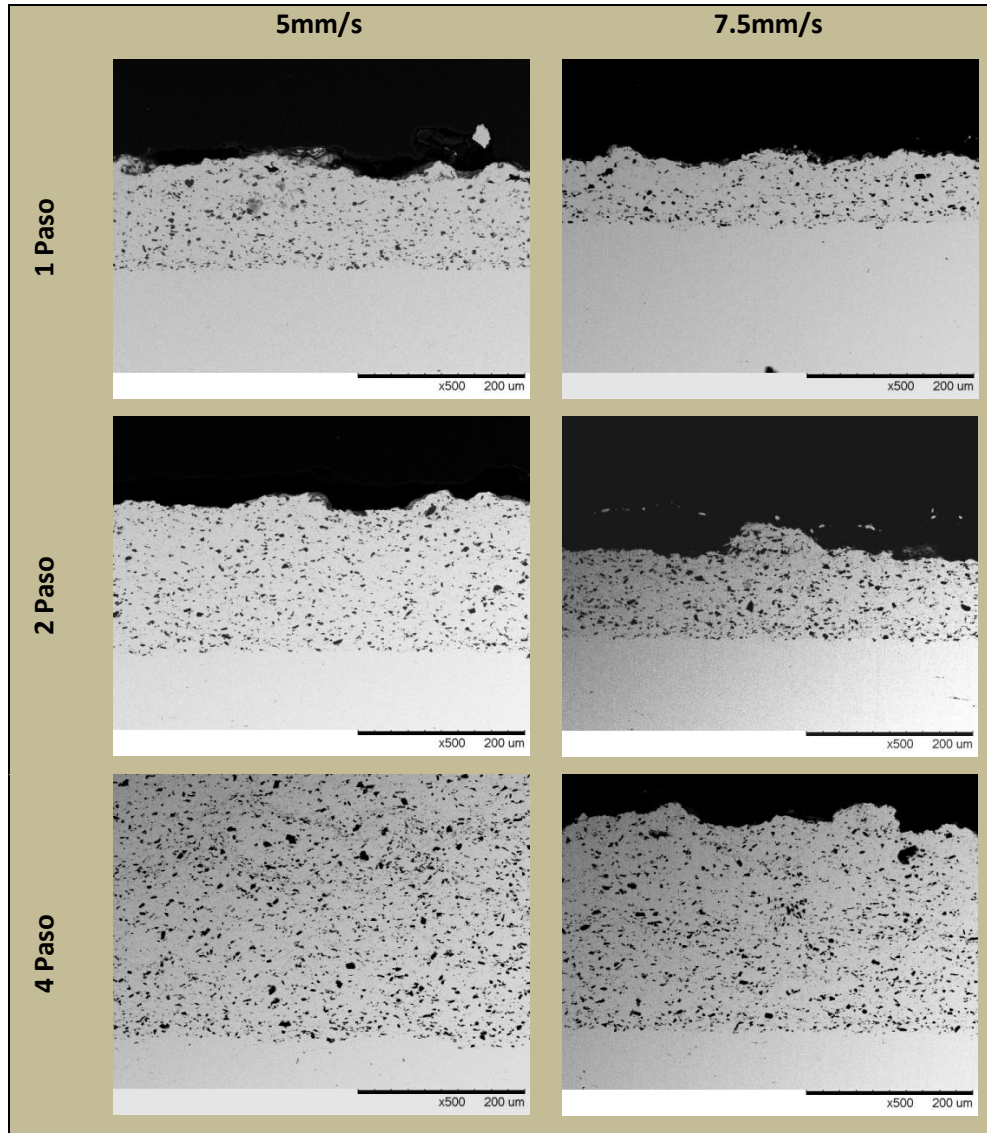
Şekil 5.1'deki makro fotoğraflar göz önünde bulundurulduğu zaman , 1 ve 2.5 mm/sn hızlarda yapılan kaplamaların yüzeylerinde oksit oluştuğu renk değişimi sayesinde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak düşük proses hızı düşünülebilir. Yüksek basınçtaki havanın altlık yüzeyi ile düşük proses hızından dolayı daha çok süre temasta olması ve aynı yüzeye çarpan partikül sayısının çok olması ile birlikte lokal ısınmaların artması bakır tozlarının oksitlenmesine yol açmaktadır.

Makro fotoğrafları verilen numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.2 ve 5.3'de verilmiştir. Bu görüntüler göz önünde bulundurularak kaplamaların altlık malzeme yüzeyi ile olan ilişkileri kontrol edilmiştir.



Şekil 5.2 : Hacimce %25 Al_2O_3 içeren toz karışımı ile 1 ve 2.5 mm/s hız değerlerinde ve farklı paso sayısında yapılmış kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Taramalı elektron mikroskop çalışmaları kaplamaların yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğunu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde sıkıca bağlandığını ortaya çıkarmıştır.



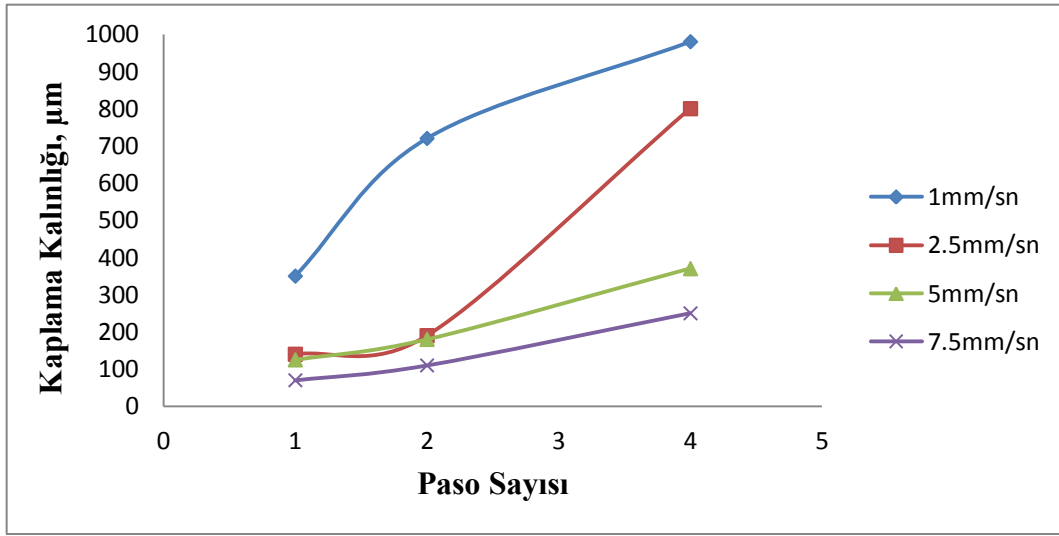
Şekil 5.3 : Hacimce %25 Al_2O_3 içeren toz karışımı ile 5 ve 7,5 mm/sn hız değerlerinde ve farklı paso sayısında yapılmış kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Kompozit kaplamaların kalınlık ve sertlik değerleri Şekil 5.4 ve 5.5’de verilmiştir. Sabit işlem ve besleme hızlarında artan paso sayısı ile beraber kaplama kalınlıkları artmıştır. Diğer taraftan paso sayısı ile beraber kaplama sertlik değerlerinin çok fazla değişmediği gözlenmiştir. Sabit paso ve besleme hızında işlem hızının değişmesiyle sertlik değerleri değişmiştir.

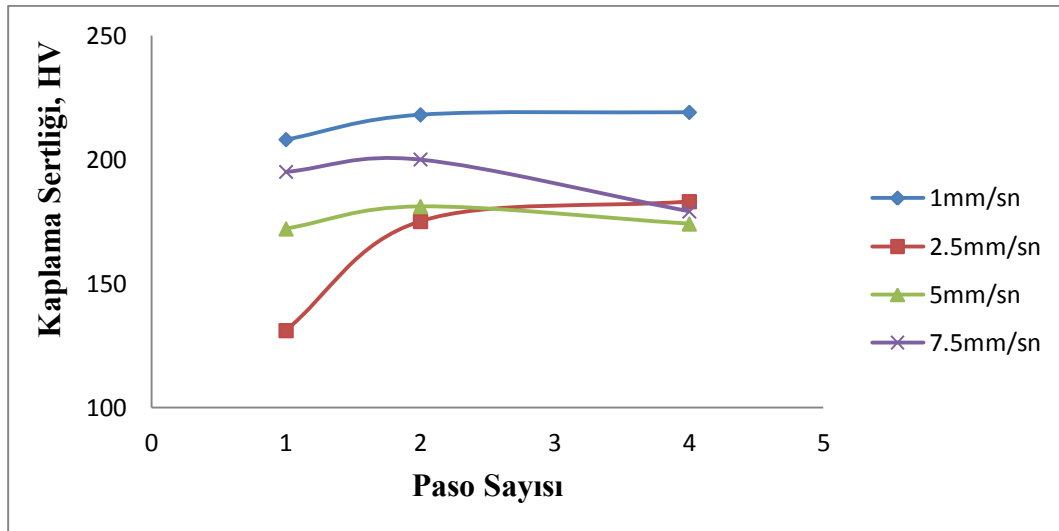
Kaplama hızının 1 mm/sn ve 2.5 mm/sn işlem hızında yapılan kompozit kaplama işlemi sırasında bakırın şiddetli oksitlenmesinden dolayı , bu parametlerin çalışmalarımız için uygun olmadığına karar verilmiştir. İşlem sırasında oksitlenme

bakır tozlarının birbirlerine sıkıca bağlanmalarını engelleyebileceği ve yapışmayı azaltabileceği düşünülmüştür.

Bakır tozlarının oksitlenmesi sebebiyle daha yüksek işlem hızları ile yapılan kaplamaların uygun olacağına karar verilmiştir. 5mm/sn ve 7.5mm/sn hızlarıyla yapılan kaplamaların kaplama kalınlığı ve sertlik değerleri karşılaştırıldığı zaman , SGBP tekniği ile üretilecek olan kompozit kaplama için en uygun parametrenin 5mm/sn hız ve 4 paso sayısında olmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.4 : %25 Al₂O₃ içeren karışım ile elde edilen kaplamaların hız, paso sayısı ve kaplama kalınlığı ilişkisi.

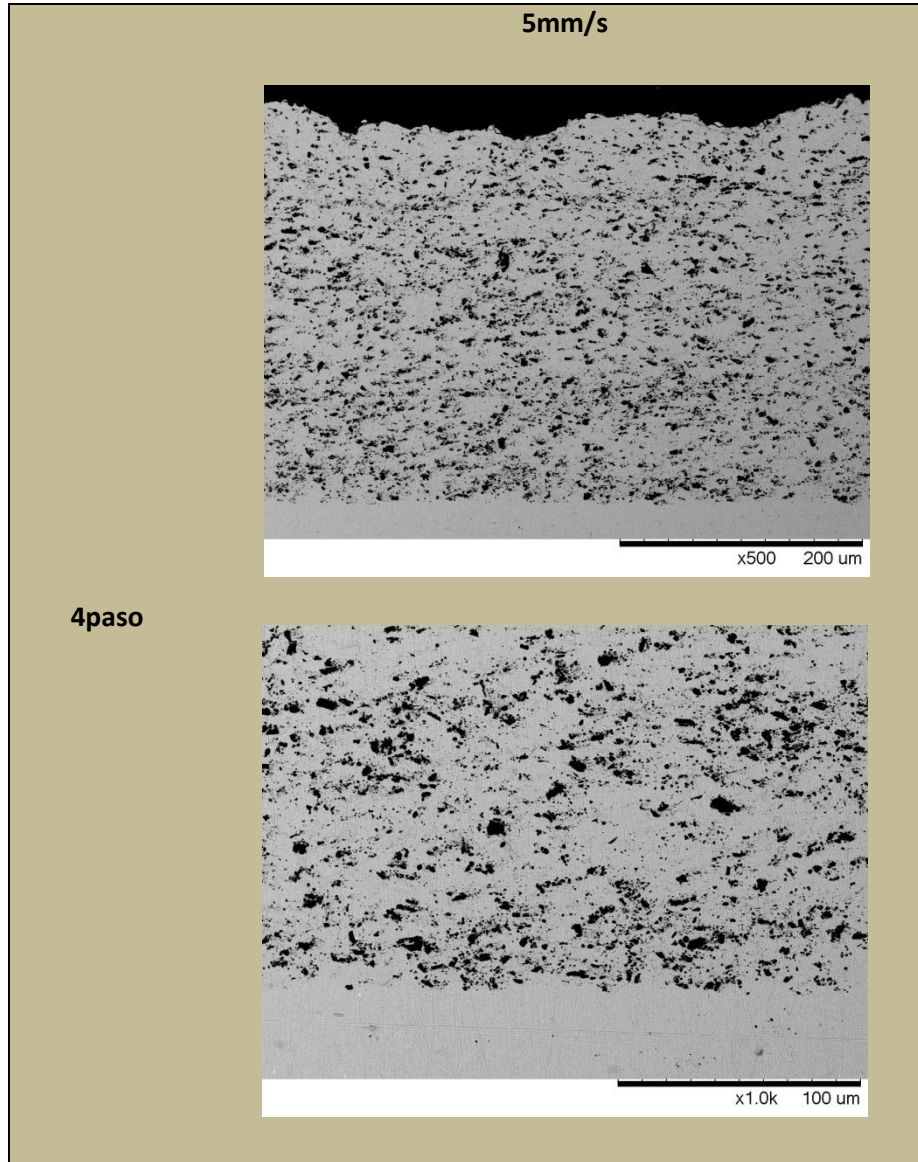


Şekil 5.5 : %25 Al₂O₃ içeren karışım ile elde edilen kaplamaların hız, paso sayısı ve sertlik ilişkisi.

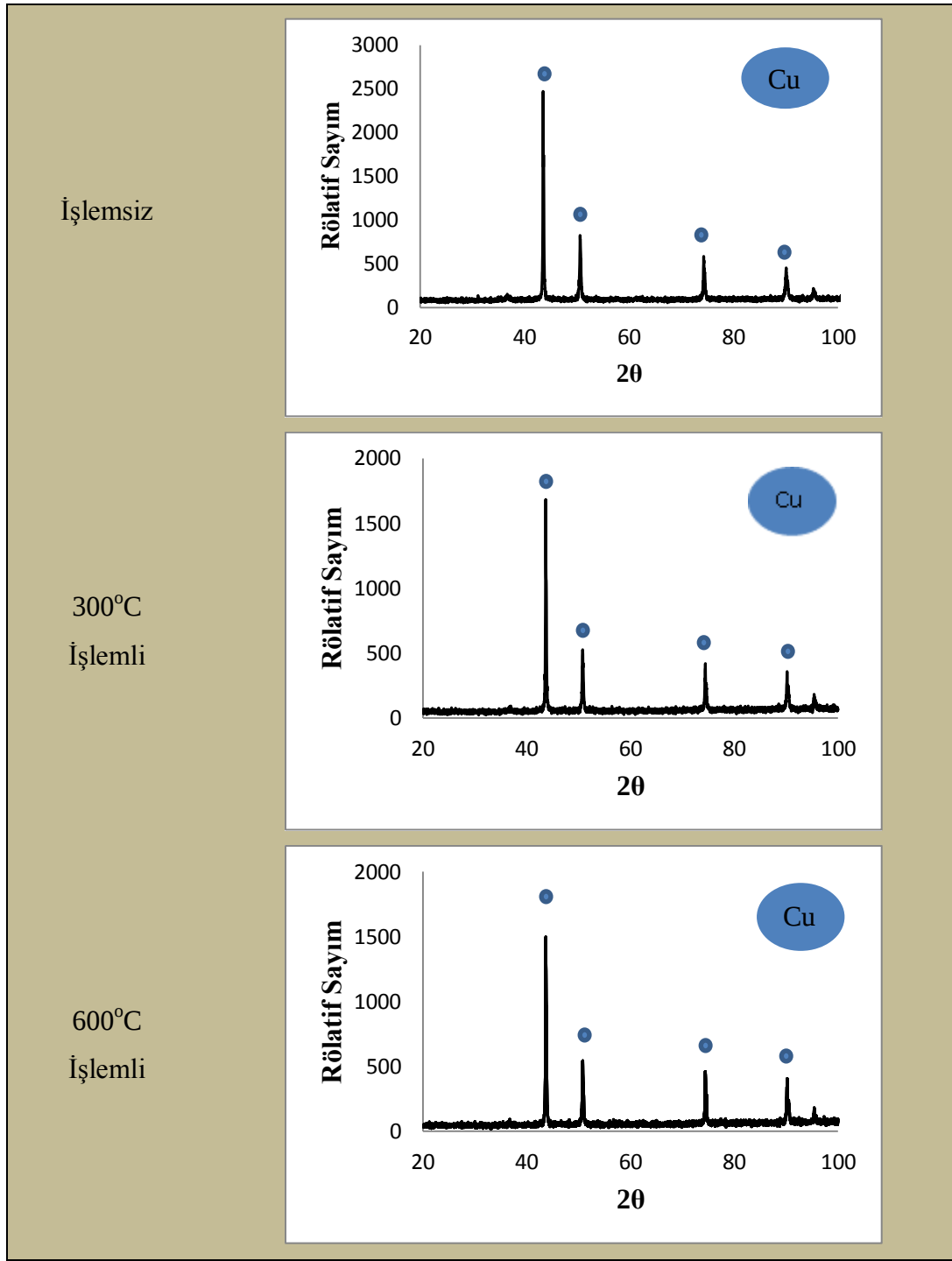
5.2 Uygun Parametreler Seçildikten Sonra Yapılan Çalışmaların Sonuçları

5.2.1 Kaplanmış yapıların yüzey incelemeleri

Yapılan ön çalışmalar sonucunda uygun görülen parametreler kullanılarak bakır altlık malzemesi üzerine tek bir çizgi yerine , tüm alanı kaplıyacak şekilde kaplama yapılmıştır. Yeniden yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen numunelere aynı metalografik işlemler uygulanmış ve taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.6’de verilmiştir. Siyah görünen bölümler Al_2O_3 parçacıklarını göstermektedir.



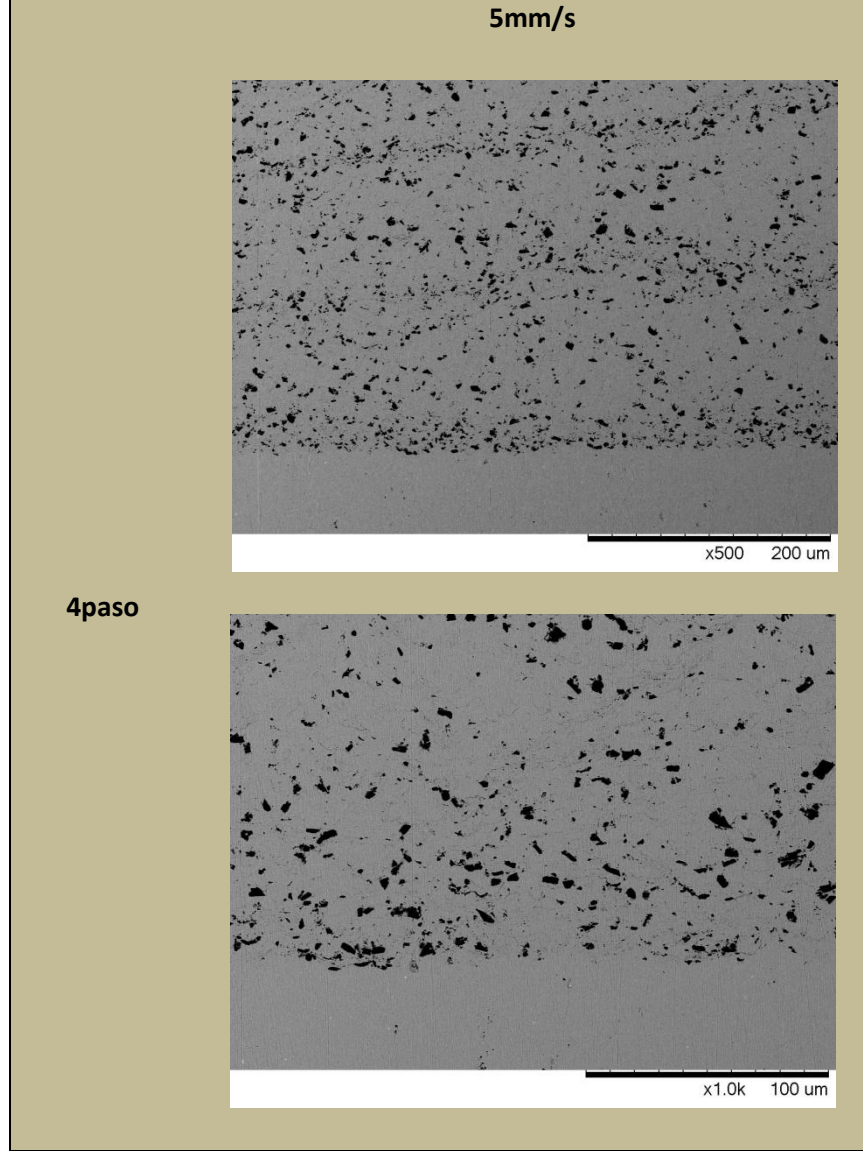
Şekil 5.6 : Hacimce %25 Al_2O_3 içeren toz karışımı ile 5mm/sn hız değerinde ve 4 paso sayısında yapılmış kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.7 : Hacimce %25 Al₂O₃ içeren toz karışımı ile yapılmış kaplamaların XRD paternleri.

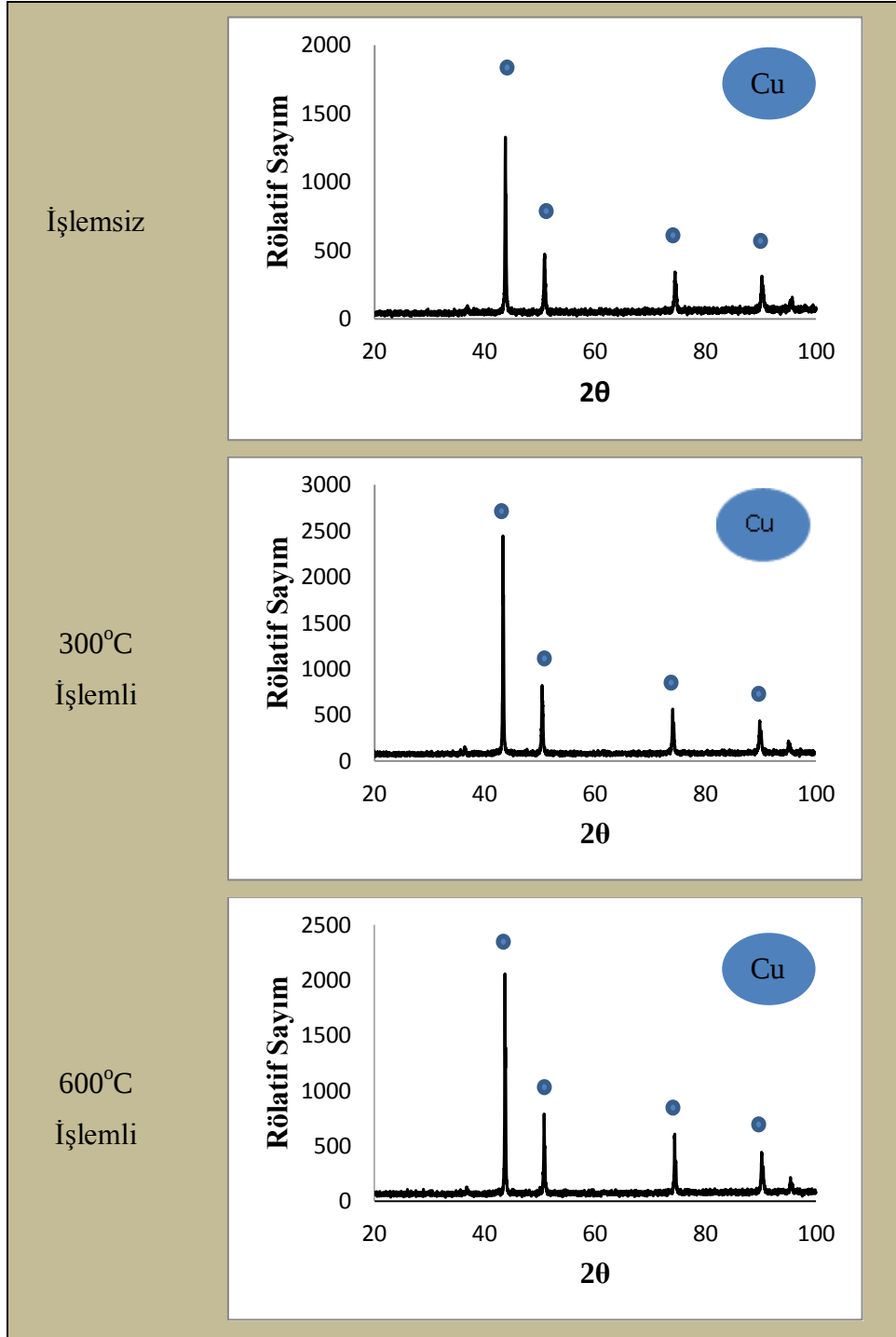
Taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiş olan hacimce % 25 Al₂O₃ içeren kaplamaların yapılarındaki fazları analiz etmek için yapılan XRD deneylerinin sonuçları Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.7’deki XRD paternlerinde Al₂O₃ fazının görülmemesinin sebebi, kaplama verimliliğinin düşük olması nedeni ile kaplamalardaki Al₂O₃ fazının %5’in altında bir miktarda bulunması olabilir. Yapılan ısıtıl işlem uygulamalarından sonra fazlarda herhangi bir değişiklik görülmemiştir.

Hacimce %25 Al_2O_3 içeren toz karışımı ile yapılan kaplamalarda seramik miktarının kaplama verimliliği üzerine etkilerini görmek ve bu kaplamaları birbirleri ile karşılaştırılmak üzere hacimce %12.5 Al_2O_3 içeren toz karışımı ile kaplamalar yapılmıştır. Bu kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.8’da verilmektedir.



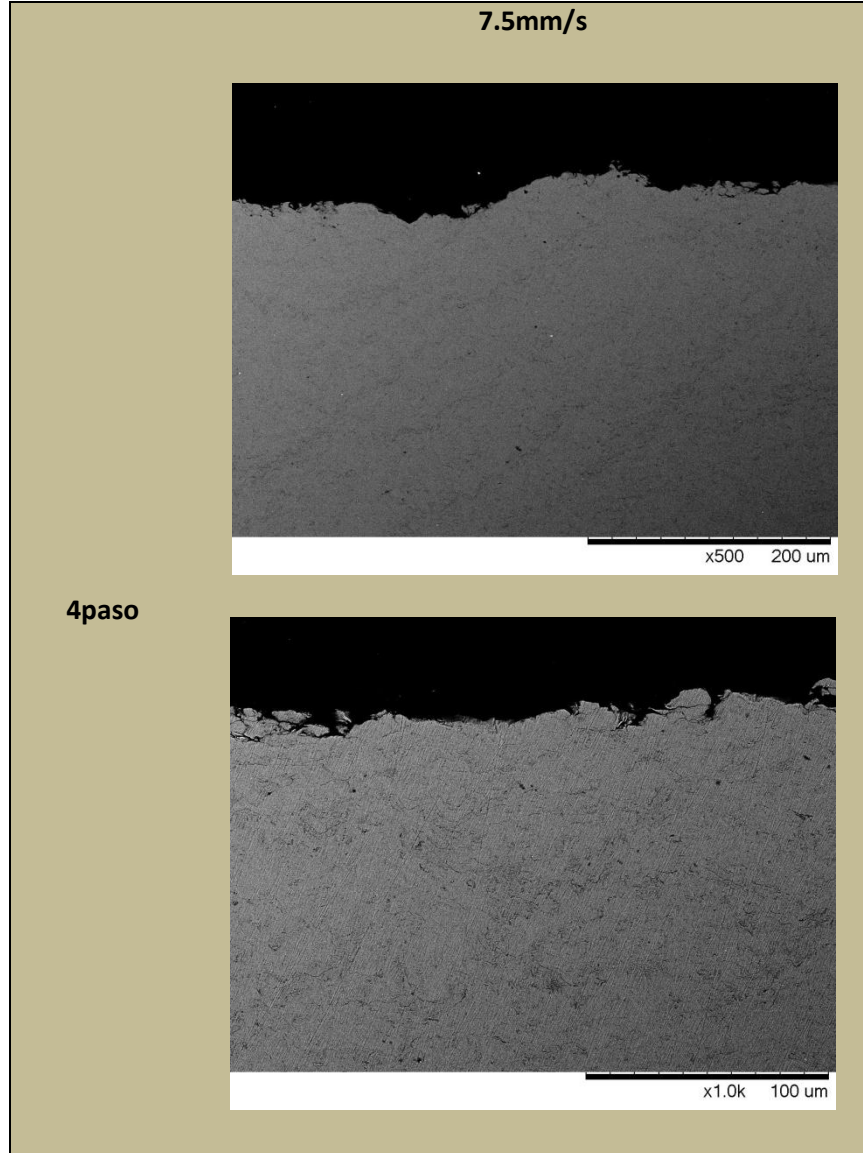
Şekil 5.8 : Hacimce %12.5 al_2o_3 içeren toz karışımı ile 5mm/s hız değerinde ve 4 paso sayısında yapılmış kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiş olan hacimce % 12,5 Al_2O_3 içeren kaplamaların yapılarındaki fazları analiz etmek için yapılan XRD deneylerinin sonuçları Şekil 5.9’de verilmiştir. Yapılan ısıtıl işlem uygulamalarından sonra fazlarda herhangi bir değişiklik görülmemiştir.



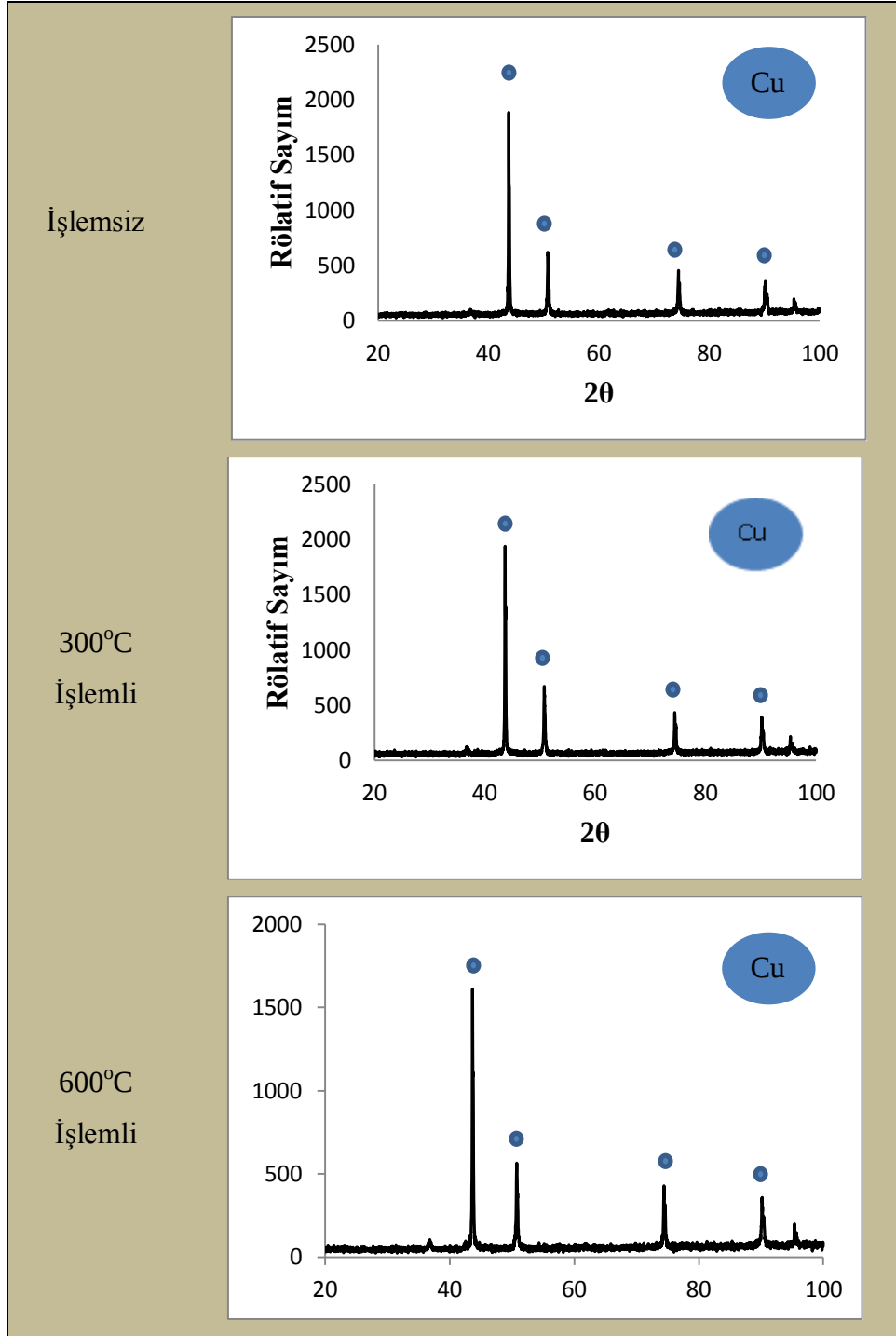
Şekil 5.9 : Hacimce %12,5 Al_2O_3 içeren toz karışımı ile yapılmış kaplamaların XRD paternleri.

Püskürtülen tozların içerisinde seramik malzeme olmadığında yapılan kaplamaları değerlendirmek amacıyla bakır altlık malzemesinin üzerine içerisinde seramik bulunmayan %100 bakır tozları püskürtülmüş ve sonuçlar yapılan karakterizasyon işlemleri ile analiz edilmiştir. Bu kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.10’da verilmektedir.



Şekil 5.10 : Saf bakır tozları ile 7.5 mm/s hız değerinde ve 4 paso sayısında yapılmış kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiş olan saf bakır tozlarını içeren kaplamaların yapılarındaki fazları analiz etmek için yapılan XRD deneylerinin sonuçları Şekil 5.11’de verilmiştir. Yapılan ısıtıl işlem uygulamalarından sonra fazlarda herhangi bir değişiklik görülmemiştir.



Şekil 5.11 : Saf bakır tozları ile yapılmış kaplamaların XRD paternleri.

Taramalı elektron mikroskop çalışmaları kaplamaların yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğunu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde sıkıca bağlandığını ortaya çıkarmıştır.

Kaplamalarda yapılan XRD analizlerine göre de herhangi değişik bir faz ortaya çıkmamıştır. Fakat plastik deformasyona bağlı olarak oluşan iç gerilmeler sebebiyle XRD piklerinde genişleme gözlemlenmiştir. Çizelge 5.1’de ısıt işlemsiz ve işlemlı kaplamaların XRD analizlerindeki bakır pik yüksekliğinin yarı genişlik değeri örneğ olarak verilmiştir. Isıt işlem ile birlikte azalan iç gerilmelerden dolayı piklerin genişlik değeri daralma gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.1 : Kaplamaların ısıt işlemlı ve işlemsiz hallerinin XRD analizlerindeki pik genişlik değeri

Pik Genişliği Değeri (FWHM)(°)			
Seramik Miktarı	Isıt işlem sıcaklıkları		
	İşlemsiz	300°C	600°C
%25	0,09	0,1	0,08
%12,5	0,14	0,09	0,09
%0	0,1	0,09	0,09

Kaplama işlemleri tamamlandıktan sonra metalografik işlemlerden geçen numunelerin optik mikroskop ile alınan görüntüleri üzerinden görüntü analiz yöntemi kullanarak yapı içerisinde bulunan gerçek seramik miktarları ölçülmüştür. SGDP yönteminde kaplama yapısının üretilebilmesi tozların plastik deformasyonuna bağlıdır. Seramik tozlarının plastik deformasyona uğramamasından dolayı kaplama içerisinde metal partiküllerin arasında kilitli kalırlar. Bu sebeple kaplama yapılmadan önce toz karışımına konulan seramikler püskürtme sırasında altlık malzemelerin yüzeylerinden geri sekebilirler. Bu da kaplamanın içindeki seramik miktarlarını ilk duruma göre azalmasına yol açmaktadır. Kaplamaların içinde kalan ortalama seramik miktarları Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kaplama yapılarında bulunan % seramik miktarları.

Kaplamalardaki seramik miktarları (%)		
Başlangıç toz karışımındaki	Kaplamadaki	Verim (%)
25	4,7	18,8
12,5	3,9	31,2

Çizelge 5.2’den de görüldüğü üzere kaplama uygulamalarında kullanılan seramik miktarı 2 katına çıkarıldığında, kaplamanın içinde kalan seramik % oranı azalmıştır. Bu sonuçlar çerçevesinde %12,5 seramik miktarı ile yapılan kaplamaların verimi yaklaşık %30 mertebesinde iken, %25 seramik miktarı ile yapılan kaplamaların verimi yaklaşık %20 mertebesinde dir.

5.2.2 Sertlik deney sonuçları

Yapılan kaplama çalışmalarından sonra elde edilen sertlik ve kaplama kalınlığı değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

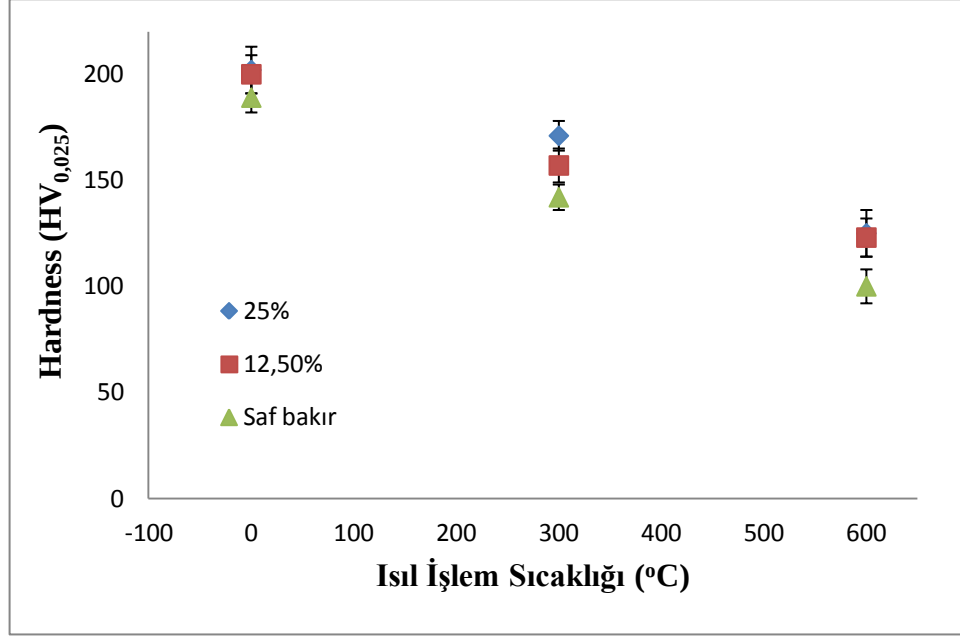
Çizelge5.3 : Değişik seramik oranlarındaki kaplamaların kaplama kalınlığı ve sertlik değerleri.

Seramik Miktarı					
%25		%12,5		%0	
Kaplama Kalınlığı (µm)	Sertlik (HV _{0,025})	Kaplama Kalınlığı (µm)	Sertlik (HV _{0,025})	Kaplama Kalınlığı (µm)	Sertlik (HV _{0,025})
700	202±11	500	200±9	450	189±7

Toz karışımı içerisindeki seramik miktarının azalması ile kaplamanın sertlik değerinde farkedilir bir değişim gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi olarak hacimce %12,5 seramik içeren kaplama ile %25 seramik içeren kaplamaların gerçekte yapılarındaki seramik oranlarının birbirine yakın olması söylenebilir. Seramik olmadığı durumda yapılan kaplamanın sertliğinin sadece plastik deformasyondan sağlanmasından dolayı seramik olan duruma göre sertliğinin daha düşük çıkması normal karşılanmıştır. Altlık malzemenin başlangıçtaki ortalama sertlik değerinin

(105 HV_{0,025}) olduğu düşünöldüğünde , yapılan kaplamaların sertlik özelliği bakımından olumlu gelişme sağladığını görmekteyiz.

Değişik seramik oranlarındaki ve saf bakır tozları ile yapılan kaplamaların 300 ve 600°C sıcaklıklarında ısıt işleme tabii tutulduktan sonra , kaplamalar üzerinden alınan sertlik değeri Şekil 5.12’de verilmiştir.

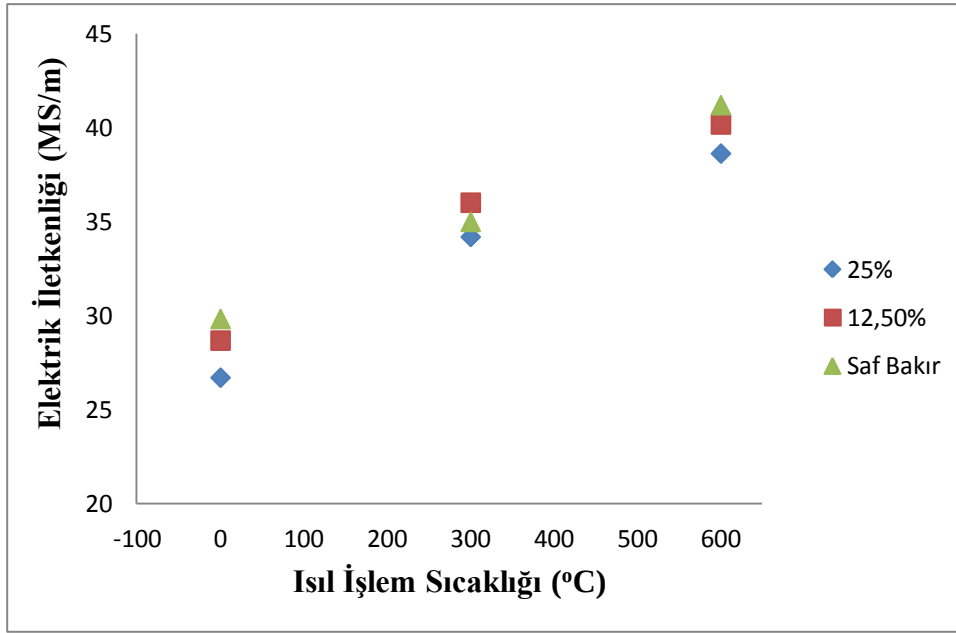


Şekil 5.12 : Değişik ısıt işleme uygulanmış kaplamaların sertlik değeri.

Yapılan ısıt işleme uygulamalarından sonra sertlik değeri tüm numuneler için değişmiştir. 300°C sıcaklığında yapılan ısıt işleme sonucu sertlik değeri yaklaşık %15 azalırken , ısıt işleme sıcaklığı 600°C ye çıkarıldığı zaman sertlik değeri ilk duruma göre yaklaşık olarak %40 oranında düştüğü gözlemlenmiştir.Yapılan ısıt işleme sayesinde plastik deformasyondan gelen iç gerilmelerin azalmasının sertlik değeri düşmelere sebep olduğu düşünölmektedir.

5.2.3 Elektrik İletkenliği Değeri

Isıl işleme uygulanmış ve uygulanmamış olan değişik seramik oranlarındaki ve saf bakır tozları ile yapılan kaplamaların yüzeylerinden alınan elektrik iletkenlik değeri ortalamaları Şekil 5.13’de verilmiştir.



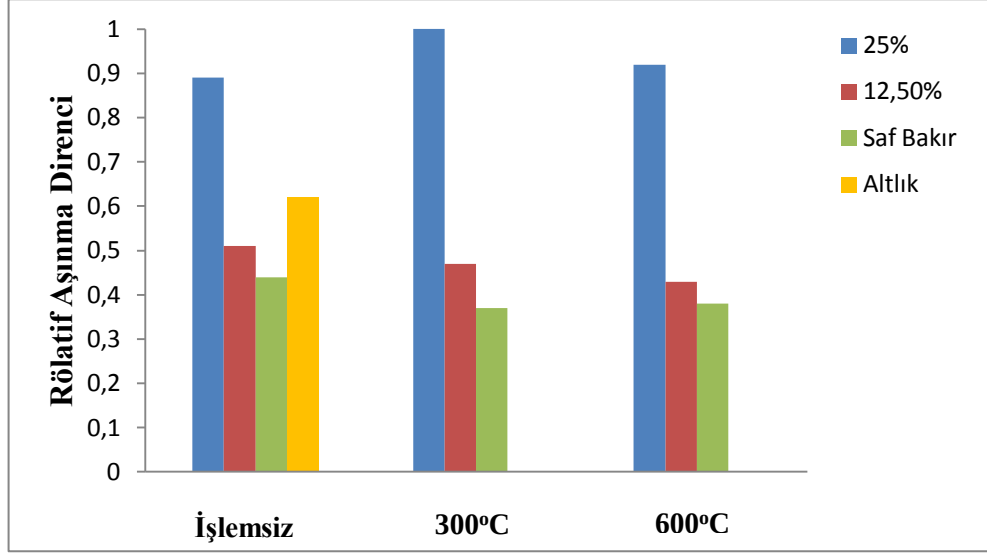
Şekil 5.13 : Değişik seramik miktarı içeren kaplamalara farklı ısıtma uygulanması durumunda ortalama elektrik iletkenliği değerleri.

Şekil 5.13'deki sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, seramik miktarına bağlı olarak elektrik iletkenliği değerlerinin çok az miktarda değiştiği görülmekle birlikte yapılan ısıtma uygulamaları sonucunda elektrik iletkenliği değerleri her seramik oranında doğrusal olarak değişmiştir. Bakır tozları ile seramik tozlarının karıştırılarak yapılan kompozit kaplamalarda seramik tozlarının safsızlık gibi bir davranış göstermesinin, elektrik iletkenliği değerlerinde bu küçük değişimin sebebi olabileceği söylenebilir. Ama tek bir numunenin ısıtma işlemi ve işlemler örneklerine bakıldığında, elektrik iletkenliği değeri %50'ye varan artışlar göstermektedir. Bunun sebebi olarak ısıtma işleminin sinterleme özelliğinin taneleri büyütmesi ve yapıdaki küçük boşlukları kapatarak taneler arası iletişimi artırması söylenebilir. Ayrıca yapıdaki iç gerilmelerin azalması (XRD pik genişlikleri ile ispatlanan) da elektrik iletkenliği değerindeki artışın sebebi olarak gösterilebilir. Altlık malzemenin başlangıçtaki elektrik iletkenliği değerinin 55 MS/m olduğu göz önünde bulundurulduğunda, saf bakırla yapılmış kaplamanın 600°C ısıtma işleminden çıkan sonucun (41 MS/m) saf altlık bakıra en yakın değerde olduğu görülmüştür.

5.2.4 Aşınma deneyi sonuçları

Aşınma testlerinin sonucunda oluşan izler üzerinden profilometre yardımı ile alınan genişlik ve derinlik değerleri kullanılarak ortalama aşınma izi alanları hesaplanmıştır.

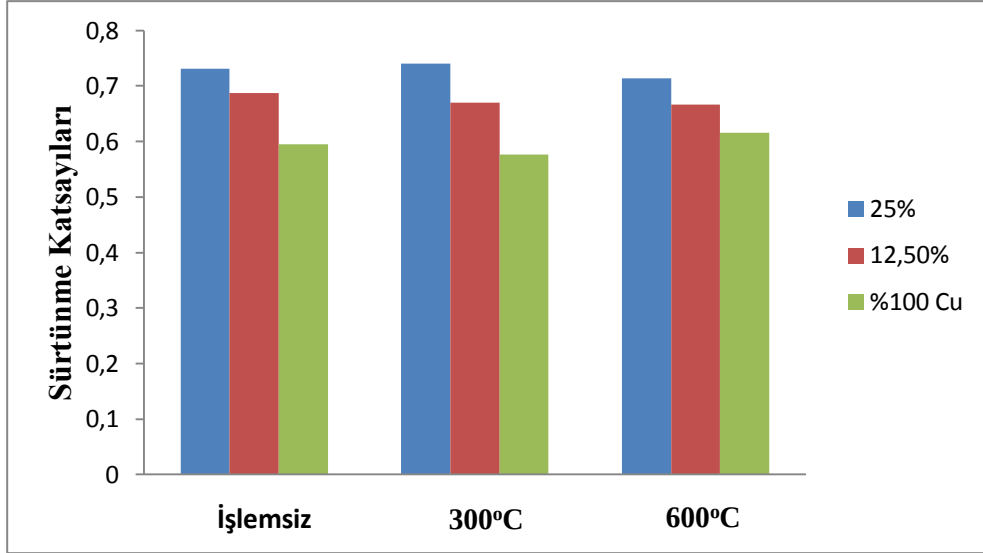
Bu alan değerleri dikkate alındığında en büyük alan hacimce %25 Al₂O₃ içeren kaplamanın 300°C’deki ısıt işlemleri halinde bulunmuştur. Alan değerleri kendi aralarında en çok aşınan numunenin aşınma direnci 1 olacak şekilde kıyaslanmıştır. Bu şekilde numunelerin rölatif aşınma değerleri bulunmuş olup Şekil 5.14 de verilmiştir.



Şekil 5.14 : Isıl işlemleri ve işlemsiz kaplamalara ait ortalama rölatif aşınma değerleri.

Şekil 5.14’de görüldüğü üzere en çok aşınma hacimce %25 Al₂O₃ içeren kaplamanın 300°C’deki ısıt işlemleri halinde görülürken, en az aşınma saf bakır tozlarla yapılmış kaplamaların 300°C’deki ısıt işlemleri halinde ortaya çıkmıştır. 300°C’de yapılan ısıt işlem uygulamasından sonra seramik takviyeli olan kaplamalar çok fazla miktarda aşınırken, saf bakır ile yapılan kaplama daha az aşınmıştır. Isıl işlem sıcaklığının artırılması veya hiç ısıt işlem uygulanmaması hacimce %25 Al₂O₃ içeren kaplamaların aşınma direncini arttırmıştır. Saf bakırla yapılan numunelerde ise 300°C ısıt işleme göre sıcaklığın arttırılması veya hiç ısıt işlem uygulanmaması aşınma direncini düşürmektedir. Genel olarak seramik miktarının artması da aşınma direncini düşürmektedir. Tüm numunelerin aşınma izi profilleri EK A’da Şekil A.1, A.2 ve A.3’da verilmiştir.

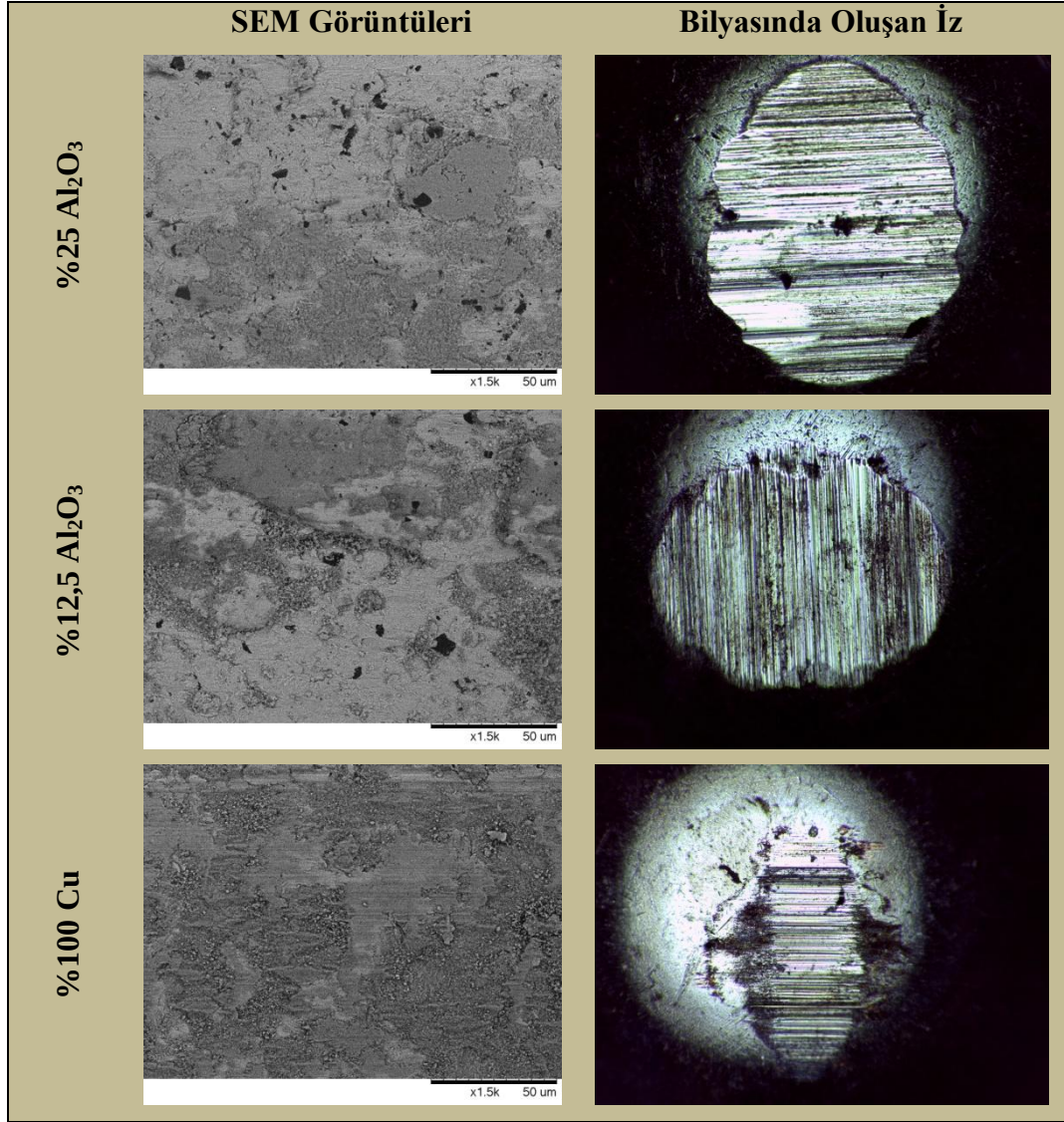
Bütün numunelere yapılan aşınma deneyleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri EK A’da Şekil A.4, A.5 ve A.6’de verilmiştir. Bu grafiklerden her bir numune için ortalama sürtünme katsayıları hesaplanmış ve Şekil 5.15’de verilmiştir.



Şekil 5.15 : Isıl işlemlili ve işlemsiz kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri.

Şekil 5.15’den de görüldüğü gibi, tüm ısıtım sıcaklıklarında ve farklı oranlarda Al_2O_3 içeren kaplama numunelerinin sürtünme katsayıları değerlerinde çok önemli miktarda bir değişim olmamıştır. Ama saf bakırla yapılan kaplamalarda seramikli olan yapılara göre daha düşük bir sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir. Bunun sebebi saf bakırla yapılan kaplamaların aşınma testi sırasında oksitlenmeye uğraması ve bu oksitlerinde yağlayıcı özelliğe sahip olmasıdır. Seramik katkılı kaplamalarda ise oksit filmlerin oluşmasından ziyade, bu film yapısının seramik partiküller tarafından kırılması söz konusudur. Bu durum da kaplamalardaki seramik miktarının aşınma miktarını artırıcı bir özellik olduğunu göstermektedir. Saf bakır tozları ile yapılan kaplamaların EK A’da Şekil A.4, A.5 ve A.6’deki sürtünme katsayısı grafiklerine bakıldığı zaman, deney başladığından 500 sn sonra sürtünme katsayısı değeri düşmekte ve o seviyede ilerlemektedir. Bu da ortalama değeri düşürmektedir.

Şekil 5.16 ve EK A’da Şekil A.7, A.8’deki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri analiz edildiğinde, %100 bakır tozları ile üretilmiş olan kaplamalarda herhangi bir madde kopmasının olmadığı sadece aşınma yönünde çiziklerin olduğu görülmüştür. Seramik katkılı kaplamalarda ise aşınma esnasında madde çıkışlarının olduğu aşınma profillerinde gözlemlenen bazı bölgelerdeki ani derinliklerinden tahmin edilmektedir. Metal-metal bağlanmanın çok daha kuvvetli olduğu bu aşınma sisteminde, seramik malzemelerin aşınma yüzeyinden kopması beklenebilir.

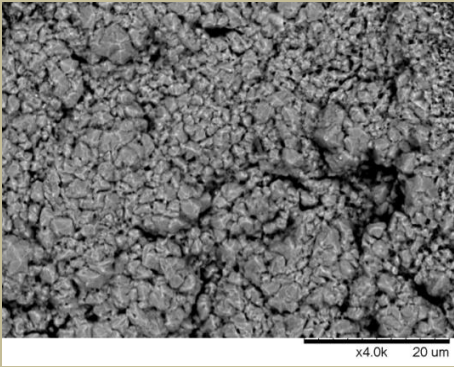
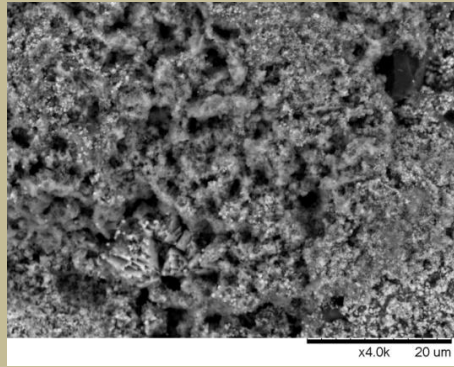
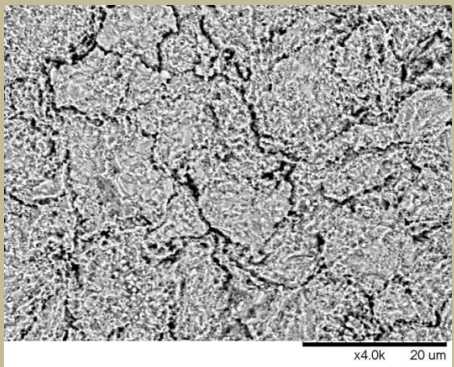
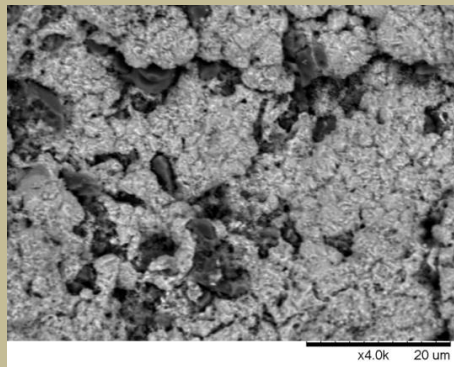


Şekil 5.16 : Isıl işlemsiz numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (1500x) ve bilyada oluşan izin optik mikroskop (OM) görüntüleri (100x).

Aşınma deneyinde kullanılan çelik topun Şekil 5.16 ve EK A'da Şekil A.9, A.10'daki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde yüzeylerin temiz olduğu ve aşınma çizgilerinde bulunduğu gözlemlenmektedir. Çelik topun aşınma davranışının bu gözlemlere bağlı olarak abrasif olduğu söylenebilir. Kaplamaların aşınma izlerinden alınan EDS analizi sonuçlarından ise çelik toplardan madde kaybının olup, aşınma yüzeylerine yapıştığı görülmüştür. Seramik miktarının fazla olması çelik topun daha çok aşınmasına sebep olmuştur, bu sonuca aşındırıcı topun optik mikroskop görüntülerindeki aşınmış alanlarının büyümesinden varılmıştır.

5.2.5 Korozyon deneyi sonuçları

Korozyon yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 5.17’ de verilmiştir. Saf bakır kaplama ile seramik takviyeli kompozit kaplamaların korozyon yüzeyleri incelendiğinde, farklı miktarda korozyon hasarları gözlemlenmiştir. Kompozit kaplamalarda bulunan seramik partiküller korozyon deneyleri esnasında oluşan hasarları arttırmıştır. Kaplama işlemlerinden sonra ısıtıl işlem uygulanmış numunelerde ise korozyon hasarları daha az miktarda gözlemlenmektedir.

Korozyon Yüzeylerinin SEM Görüntüleri		
	%100 Cu	%12,5 Al ₂ O ₃
Isıl işlemsiz		
300°C ısıtıl işlemli		

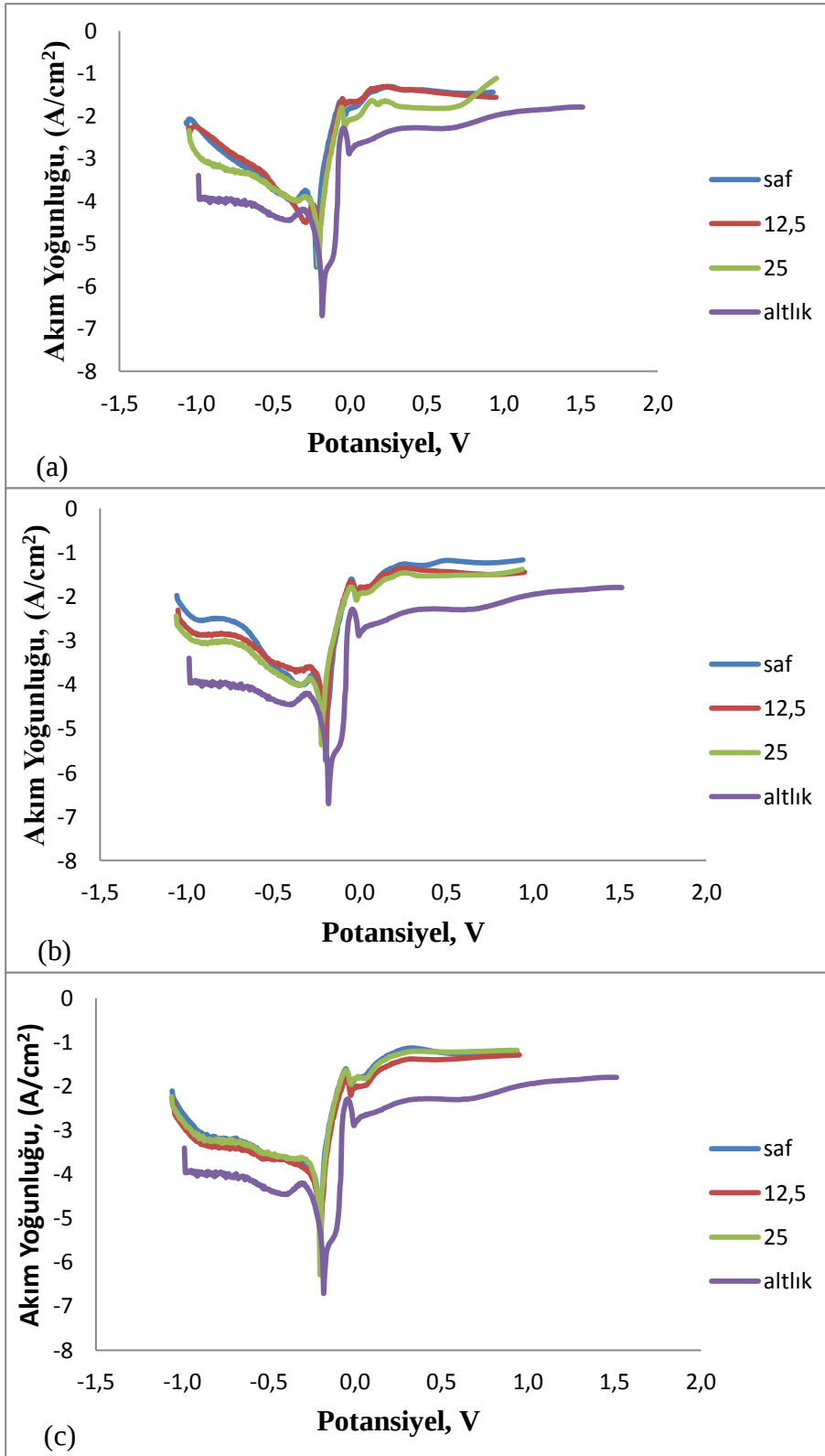
Şekil 5.17 : Korozyon yüzeylerinin SEM görüntüleri

Elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda elde edilen anodik potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 5.18’de verilmiştir. Verilen eğriler korozyon deneyleri öncesinde yapılan ısıtıl işlem uygulamalarında değişen sıcaklıklara göre gruplandırılmış ve her bir grup içinde değişik oranlarda toz karışımı ile yapılan kaplamaların ve altlık malzemesinin korozyon davranışı incelenmiştir. Anodik polarizasyon eğrileri

incelendiğinde, saf bakır tozları ile yapılmış kaplamalar ve kompozit kaplamaların neredeyse aynı korozyon davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Isıl işlem uygulanmış veya uygulanmamış kaplamaların grafiklerinde, akım yoğunluğu ve potansiyel değerlerinde çok küçük değişikliklerin olduğu gözlemlenmiştir. Kompozit kaplamalarda seramik miktarının değişmesi korozyon davranışında bir etki yapmaması, kaplamaların içinde bulunan seramik miktarlarının birbirine yakın olması ile açıklanabilir.

Anodik potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinin kaplama numuneleri ve altlık numunesi için katodik bölgelerinde çok önemli bir değişiklik olmadığına rastlanmıştır. Bu grafiklerin anodik bölgesinde ise 0.1V potansiyel değerinden başlamak üzere pasivasyon olduğu gözlemlenmiştir. Pasivasyon bölgeleri kaplama numuneleri için 0,1-0,01 A/cm² akım yoğunluğu değerleri arasında oluşurken, altlık numunenin pasivasyon bölgesi yaklaşık 0,001 A/cm² akım yoğunluğu değerinde meydana gelmiştir.

Korozyon deneyleri sonucunda kaplama ile altlık numuneler karşılaştırıldığında, altlık malzemenin anodik potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinde akım yoğunluğu değerleri altlık malzeme için daha küçük değerlerde çıkmıştır. Potansiyel değerleri ise anodik bölgede daha yüksek değerlerde gözükmemektedir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda, kaplama numunelerin altlık numunelere göre daha kolay ve daha hızlı bir şekilde korozyona uğradığı söylenebilir.



Şekil 5.18 : Anodik polarizasyon eğrileri, (a) ısıtılmış, (b) 300°C, (c) 600°C’de ısıtılmış numuneler

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi kullanılarak değişik hacimlerde Al_2O_3 tozu ile saf bakır toz karışımları bakır altlık üzerine püskürtülmüşlerdir. Yapılan kaplamaların mikro yapı, sertlik, aşınma, elektrik iletkenliği ve korozyon dayanımı gibi özellikleri araştırılmıştır. Tüm kaplamalara 300 ve 600°C’de ısıtılma işlemi uygulanmış ve optimum özellikleri sağlayan kaplamalar belirlenmiştir.

1. Düşük poroziteli ve oksitlenmeye uğramamış kaplamaların üretilebilmesi için yapılan ön deneylerde, en uygun kaplama parametrelerinin 5mm/sn ilerleme hızında ve 4 paso sayısı olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler ile yapılan kaplamaların seramik miktarları değiştirilmiştir.
2. SEM görüntülerinden kaplamaların genellikle yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde sıkıca bağlandığı gözlemlenmiştir. Kaplamaların XRD analizlerine göre ısıtılma işlemi yapılan numuneler de dahil olmak üzere yapılarda bakırdan farklı bir faz (bakır oksit) görülmemiştir. Kaplamaların içindeki gerçek Al_2O_3 miktarları ilk toz karışımına göre çok az çıkmıştır. Hacimce %25 seramik malzeme ile yapılan kaplamada %4.7 , hacimce %12,5 seramik malzeme ile yapılan kaplamada %3,9 seramik tespit edilmiştir. Farklı miktarlarda seramik içeren toz karışımı ile yapılan çalışmalar sonucunda kompozit kaplamalar için hacimce %12.5 seramik içeren toz karışımının verimi daha yüksek çıkmıştır.
3. Sertlik değerlerinin kompozit yapılarda birbirine çok yakın çıkmasından, hacimce %12,5 ve %25 seramik oranının sertlik açısından kaplamalarda bir fark yaratmadığı sonucuna varılmıştır. En yüksek sertlik değeri %25 Al_2O_3 ile yapılan kaplamada ortalama (202 HV_{0.025}) olarak bulunmuştur. 600°C’de yapılan ısıtılma işlemi sonucunda sertlik değerleri altlığın ilk sertlik değerine kadar (105 HV_{0.025}) azalmıştır. Bu sebepten dolayı diğer özellikler göz önünde bulundurularak sertlik açısından 300°C ısıtılma işlemi uygulaması seçilebilir.

4. Elektrik iletkenliği değerleri seramik miktarı ile ters orantılı olarak değişmiştir. Isıl işlem uygulanması, elektrik iletkenliği değerlerinde doğrusal bir artış göstermiştir. Bu sebepten dolayı yüksek ısıl işlem sıcaklıklarının seçilmesi elektrik iletkenliği açısından ayırıcı bir özellik olabilir. Altlık malzemenin başlangıçtaki elektrik iletkenliği değerinin 55 MS/m iken 600°C’de yapılan ısıl işlemlerde saf bakır kaplamanın elektrik iletkenlik değeri en yüksek (41.2 MS/m) bulunmuştur.
5. Aşınma testleri sonucunda en az ve en çok aşınma değerlerinin 300°C ısıl işlem uygulanmış numunelerde görülmesi, aynı ısıl işlem koşullarında artan seramik miktarının aşınma direncini azalttığını göstermiştir. Kompozit yapılarda hacimce %12,5 Al₂O₃ içeren kaplamanın ısıl işlemsiz hali aşınma direnci açısından uygun bir seçim olabilir. Kaplamaların aşınma davranışları oksidatif ve adhesif olarak değerlendirilmiştir.
6. Elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda elde edilen anodik potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre, kaplama numuneleri seramik miktarına bağlı olmaksızın aynı korozyon davranışı göstermişlerdir. Potansiyel ve akım yoğunluğu değerleri incelendiğinde kaplamalar ile altlık numune arasında çok küçük sapmaların bulunduğu gözlemlenmiştir. Kompozit kaplamalarda bulunan çok küçük miktardaki seramik partiküller, korozyon deneyleri sonucunda akım yoğunluğu değerleri hesaplanırken ihmal edilmiş ve tüm numuneler için tek bir uygulama alanı değer kullanılmıştır.
7. Sonuç olarak, elektrik iletkenliği değerleri ve aşınma deneylerinin sonuçları dikkate alındığında, bakır altlık malzemesinin yüzey özelliklerini geliştirmek amacı ile 600 °C’de ısıl işlem uygulanmış olan saf bakır tozları ile yapılmış kaplamalar tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Lee, H.Y., Jung, S.H., Lee, S.Y., You, Y.H. ve Ko, K.H.**, (2005). Correlation between Al_2O_3 particles and interface of Al- Al_2O_3 coatings by cold spray, *Applied Surface Science*, **252**, 1891–98.
- [2] **Moy, C.K.S., Cairney, J., Ranzi, G., Jahedi, M. ve Ringer S.P.**, (2010). Investigating the Microstructure and Composition of Cold Gas-dynamic Spray (CGDS) Ti Powder Deposited on Al 6063 Substrate, *Surface & Coatings Technology*, **204**, 3739-49.
- [3] **Dykhuisen, R.C., Smith, M.F., Gilmore, D.L., Neiser, R.A., Jiang, X. ve Sampath, S.**, (1999) Impact of High Velocity Cold Spray Particles, *J. Therm. Spray Technol.*, p 559–564.
- [4] **Buggy, M. ve Conlon C.**, (2004) Material Selection in the Design of Electrical Connectors, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 213-8.
- [5] **Gök M.G. ve Kaplan M.**, (2011) Toz Metalurjisi Yöntemiyle Elektrik Kontak Malzemesi Üretimi ve Kontak Performansının Araştırılması, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey.
- [6] **Song, W. M., Yang, J.R., Ku, J.J., Hao, Y. ve Ma Y.**, (2007). Microstructure and Wear Behaviour of Ni-Based Surface Coating on Copper Substrate, *Wear*, **262**, 868-75.
- [7] **Güler Ö. ve Evin E.** (2009), The Investigation of Contact Performance of Oxide Reinforced Copper Composite via Mechanical Alloying, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 1286-1290.
- [8] **Metals Handbook Volume 2.** Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, *ASM International*, Tenth Edition, USA.
- [9] **Batani, M. R., Ashrafizadeh, F., Szpunar, J.A. ve Drew, R.A.L.**, (2002) Improving the Tribological Behavior of Copper Through Novel Ti–Cu Intermetallic Coatings, *Wear*, **253**, 626-39.
- [10] **URL-1** <<http://www.tibtech.com/conductivity.php>>, alındığı tarih: 15.04.2012
- [11] **Tjong, S.C. ve Lau, K.C.**, (2000). Tribological Behaviour of SiC Particle-Reinforced Copper Matrix Composites, *Materials Letters*, **43**, 274-80.
- [12] **Ng, K.W., Man, H.C., Cheng, F.T. ve Yue T.M.**, (2007). Laser Cladding of Copper with Molybdenum for Wear Resistance Enhancement in Electrical Contacts, *Applied Surface Science*, **253**, 6236-41.
- [13] **Rudolphi A.K. ve Jacobson S.** (1997). On the Use of Ceramic PVD Coatings to Replace Metallic Coatings in Electrical Contacts, *Surface Coatings and Technology*, **96**, 364-72.

- [14] **The Cold Spray Materials Deposition Process Fundamentals and Applications**, 2007, Champagne V.K., Woodhead Publishing Limited, England.
- [15] **Van STEENKISTE, T.H., Smith, J.R. ve Teets, R.E.**, (2002). Aluminum Coatings via Kinetic Spray with Relatively Large Powder Particles, *Surface and Coatings Technology*, **154**, 237-52.
- [16] **Novoselova, T., Fox, P., Morgan, R. ve O'Neill, W.**, (2006). Experimental Study of Titanium/Aluminium Deposits Produced by Cold Gas Dynamic Spray, *Surface and Coatings Technology*, **200**, 2775-83.
- [17] **Grujicic M., Saylor J.R., Beasley D.E., DeRosset W.S., Helfritsch D.**, (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**, 211–27.
- [18] **Li W.Y., Liao H., Li C.J., Coddet G.L.C., Wang X.**, (2006). On High Velocity Impact of Micro-sized Metallic Particles in Cold Spraying, *Applied Surface Science*, **253**, 2852–62.
- [19] **Klinkov, S.V., Kosarev, V.F. ve Rein, M.**, (2005). Cold Spray Deposition: Significance of Particle Impact Phenomena, *Aerospace Science and Technology*, **9**, 582–91.
- [20] **Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmid, T. ve Kreye, H.**, (2006). The Cold Spray Process and Its Potential for Industrial Applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, **15**, 223-32.
- [21] **Schmidt, T., Gartner, F., Assadi, H. ve Kreye H.**, (2006). Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition, *Acta Materialia*, **54**, 729–42.
- [22] **Li, W. Y., Liao, H., Li, C. J., Bang, H. S. ve Coddet, C.** (2007). Numerical Simulation of Deformation Behavior of Al Particles Impacting on Al Substrate and Effect of Surface Oxide Films on Interfacial Bonding in Cold Spraying, *Applied Surface Science*, **253**, 5084-91.
- [23] **Li, W. Y., Liao, H., Wang, H. T., Li, C. J., Zhang, G. ve Coddet, C.** (2006). Optimal Design of a Convergent-Barrel Cold Spray Nozzle by Numerical Method, *Applied Surface Science*, **253**, 708-13.
- [24] **Li, W. Y., Liao, H., Douchy, G. ve Coddet, C.** (2007). Optimal Design of a Cold Spray Nozzle by Numerical Analysis of Particle Velocity and Experimental Validation with 316L Stainless Steel Powder, *Materials and Design*, **28**, 2129-37.
- [25] **Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T. ve Kreye, H.** (2003). Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying, *Acta Materialia*, **51**, 4379-94,
- [26] **Kang, H. ve Kang, S.B.** (2003). Tungsten/copper composite deposits produced by a cold spray, *Scripta Materialia*, **49**, 1169-74,
- [27] **Klinkov, S. V., Kosarev, V. F., Sova, A. A. ve Smurov, I.** (2008). Deposition of Multicomponent Coatings by Cold Spray, *Surface and Coatings Technology*, **202**, 5858-62,

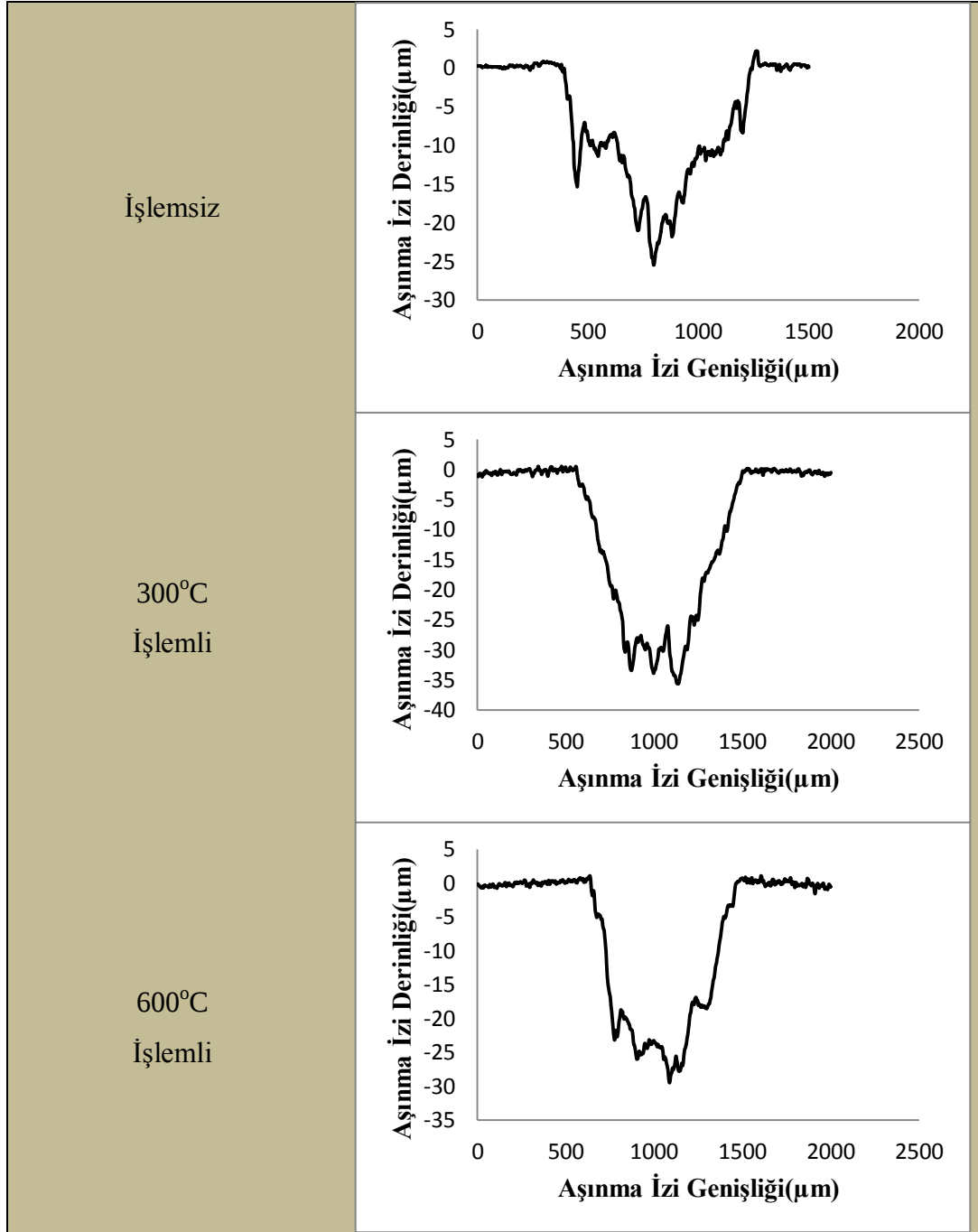
- [28] **King, P. C., Zahiri, S. H. ve Jahedi, M. Z.,** (2007). Rare Earth/Metal Composite Formation by Cold Spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, **17**, 221-27,
- [29] **John, J. E. A. ve Keith, T. G.** (2006). Gas Dynamics, *Prentice Hall*, New Jersey, United States,
- [30] **Li, C. J., Li, W. Y., Wang, Y. Y., Yang, G. J. ve Fukanuma, H.** (2005). A Theoretical Model for Prediction of Deposition Efficiency in Cold Spraying, *Thin Solid Films*, **489**, 79-85.
- [31] **Lima, R.S., Kucuk, A., Berndt, C.C., Karthikeyan, J., Kay, C.M. ve Lindemann, J.** (2002). Deposition Efficiency, Mechanical Properties and Coating Roughness in Cold-Sprayed Titanium, *J. Mater. Sci. Lett.*, **21**, 1687–1689.
- [32] **Lee, H., Shin, H., Lee, S., Ko, K.** (2008). Effect of gas pressure on Al coatings by cold gas dynamic spray , *Materials Letters*, **62**, 1579–1581
- [33] **Handbook of Thermal Spray Technology**, Thermal Spray Society and ASM International, 2004
- [34] **Voyer, J., Stoltenhoff, T. ve Kreye H.** (2003). Development of Cold Gas Sprayed Coatings, *Thermal Spray: Advancing the Science and Applying the Technology*, p 71–78
- [35] **Mctune R.C.,** Potential Applications of Cold-Spray Technology in Automotive Manufacturing, *Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology*, 63–70
- [36] **Borchers C., Gärtner F., Stoltenhoff T., Assadi H. ve Kreye H.,** (2003). Microstructural and Macroscopic Properties of Cold Sprayed Copper Coatings, *Journal of Applied Physics*, **93**, 10064-70.
- [37] **Fukumoto M., Wada H., Tanabe K., Yamada M., Yamaguchi E., Niwa A., Sugimoto M. ve Izawa M.,** (2007). Effect of Substrate Temperature on Deposition Behavior of Copper Particles on Substrate Surfaces in the Cold Spray Process, *Journal of Thermal Spray Technology*, **16**, 643-50,
- [38] **King P. C., Bae G., Zahiri S. H., Jahedi M., and Lee C.,** (2009). An Experimental and Finite Element Study of Cold Spray Copper Impact onto Two Aluminum Substrates, *Journal of Thermal Spray Technology*, **19**, 620-34.
- [39] **Li W., Li C., Liao H.,** (2010). Significant Influence of Particle Surface Oxidation on Deposition Efficiency, Interface Microstructure and Adhesive Strength of Cold-sprayed Copper Coatings, *Applied Surface Science*, **256**, 4953-58,
- [40] **Kim J.S., Kwon Y.S., Lomovsky O.I., Dudina D.V., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Kwon D.H., Smurov I.** (2007). Cold Spraying of in situ Produced TiB₂–Cu Nanocomposite Powders, *Composite Science and Technology*, **67**, 2292-96.

- [41] **Sova A., Kosarev V.F., Papyrin A., Smurov I.** (2011). Effect of Ceramic Particle Velocity on Cold Spray Deposition of Metal-Ceramic Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, **20**, 285–91.
- [42] **Koivuluoto H., Vuoristo P.**, (2010). Effect of Powder Type and Composition on Structure and Mechanical Properties of Cu + Al₂O₃ Coatings Prepared by using Low-Pressure Cold Spray Process, *Journal of Thermal Spray Technology*, **19**, 1081-92.
- [43] **Sudharshan P. P., Vishnukanthan V. ve Sundararajan G.** (2007). Effect of Heat Treatment on Properties of Cold Sprayed Nanocrystalline Copper Alumina Coatings, *Acta Materialia*, **55**, 4741-51.

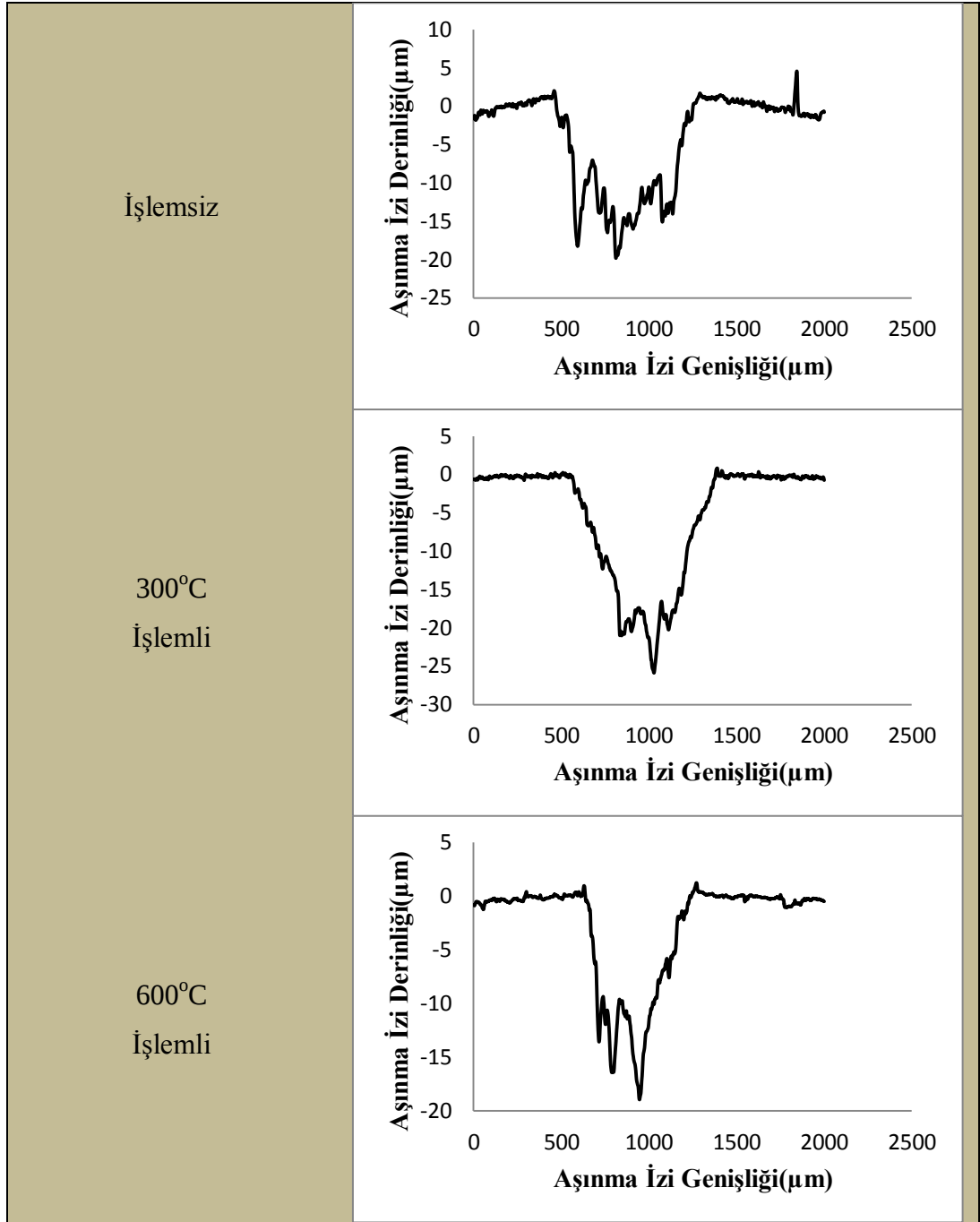
EKLER

EK A: Aşınma Deneyleri

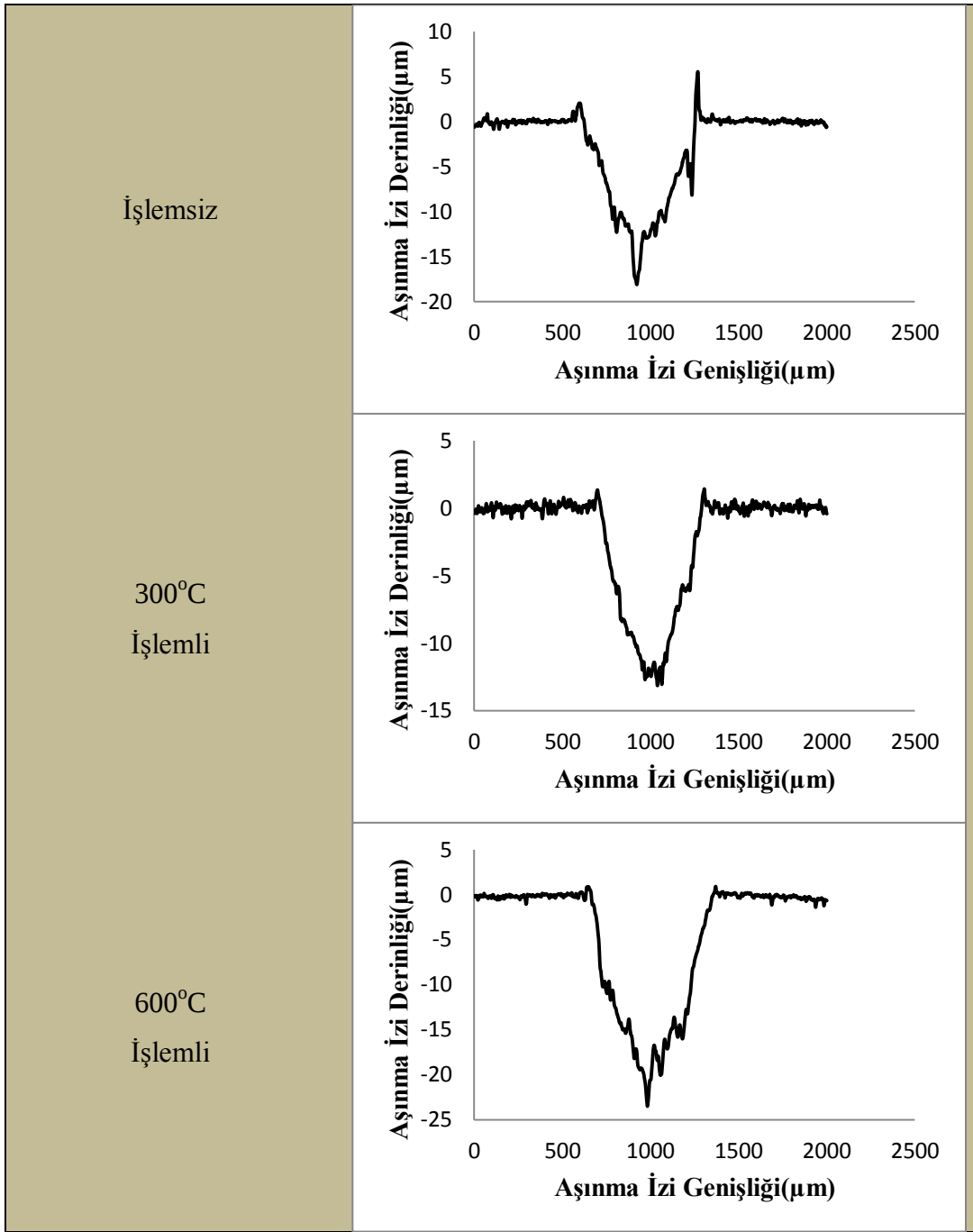
EK A



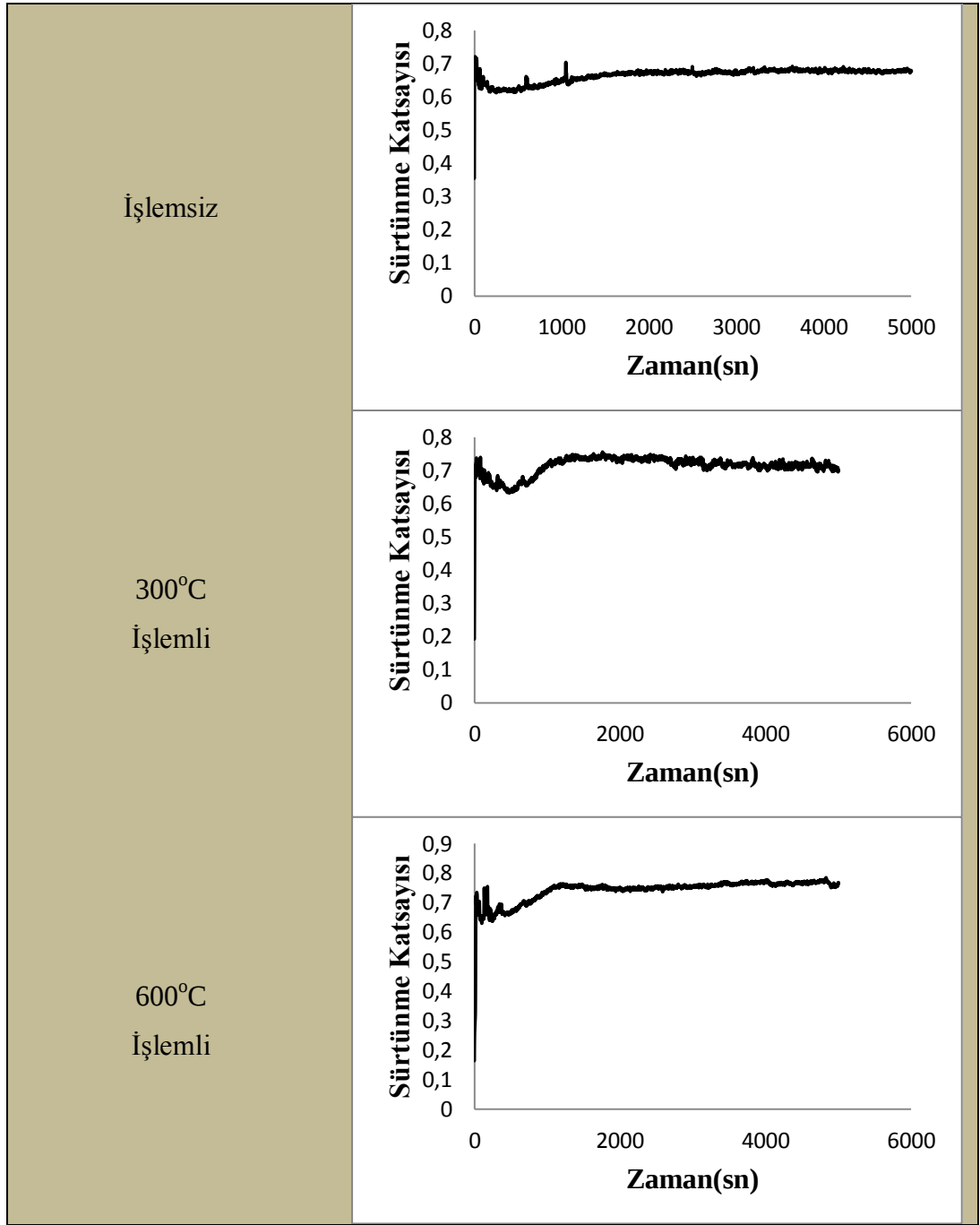
Şekil A.1 : Hacimce %25 Al_2O_3 içeren kaplamaların değişik ısııl işlem şartlarındaki aşınma izi profilleri



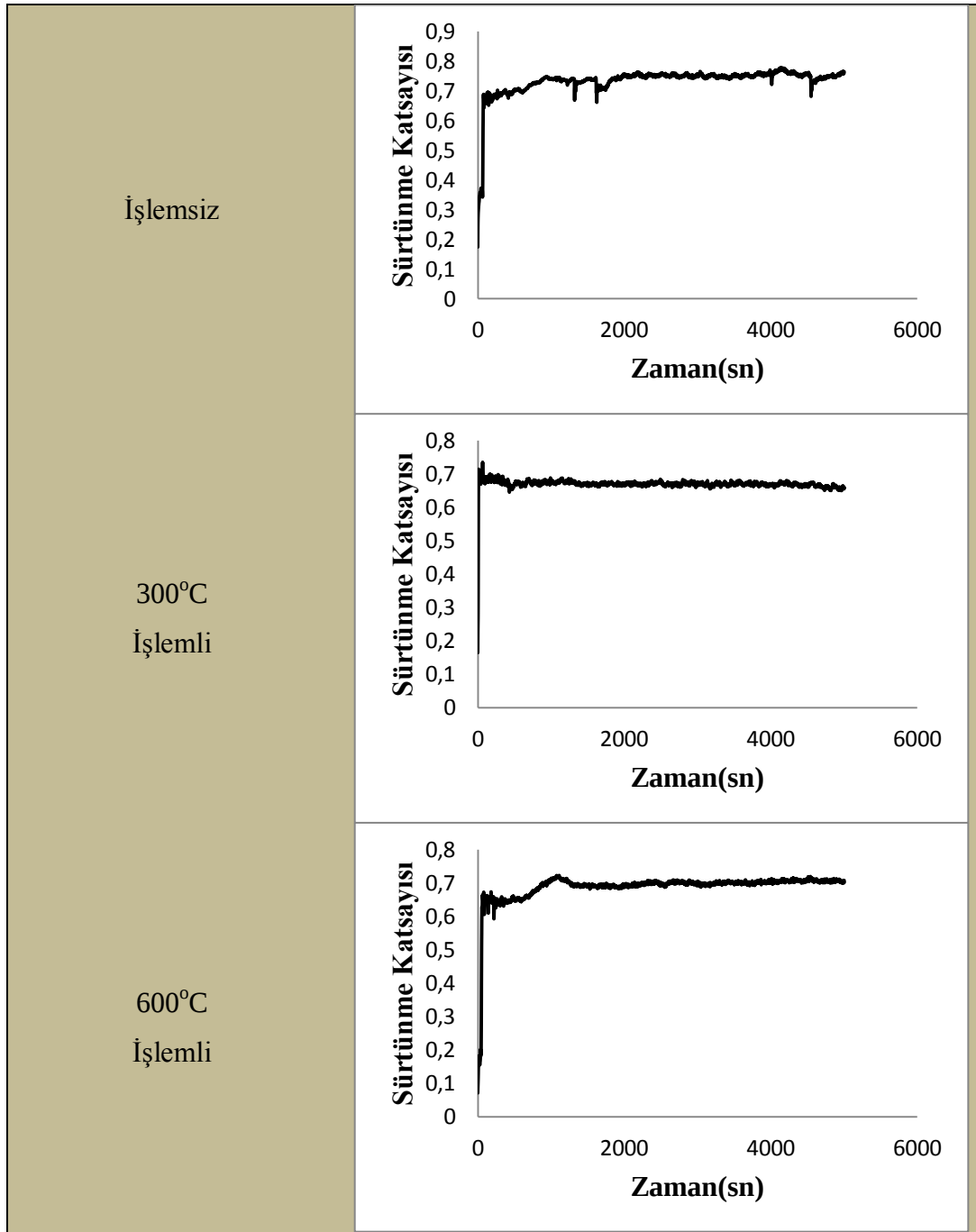
Şekil A.2 : Hacimce %12,5 Al_2O_3 içeren kaplamaların değişik ısııl işlem şartlarındaki aşınma izi profilleri



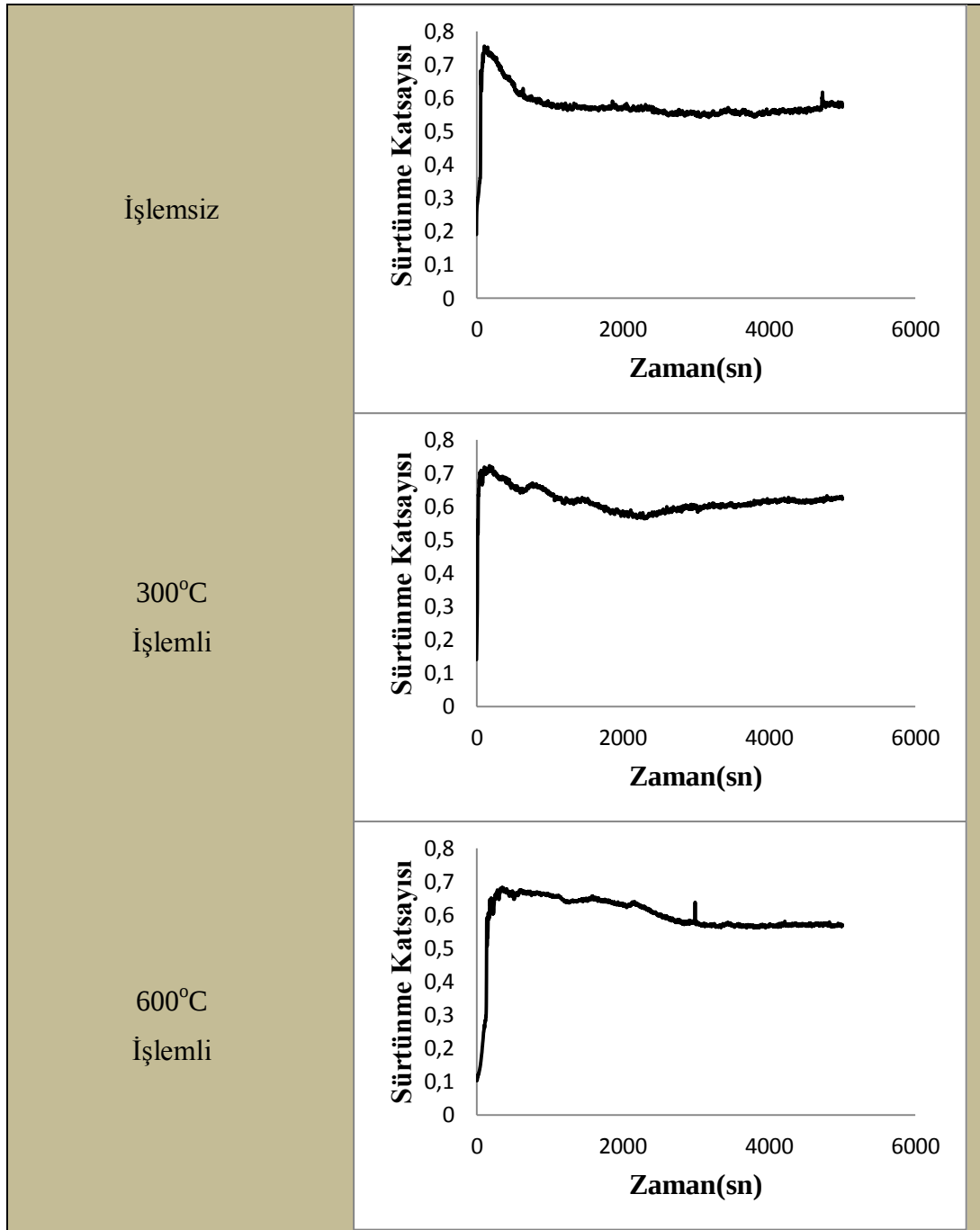
Şekil A.3 : Saf bakır tozları içeren kaplamaların değişik ısıtım işlem şartlarındaki aşınma izi profilleri



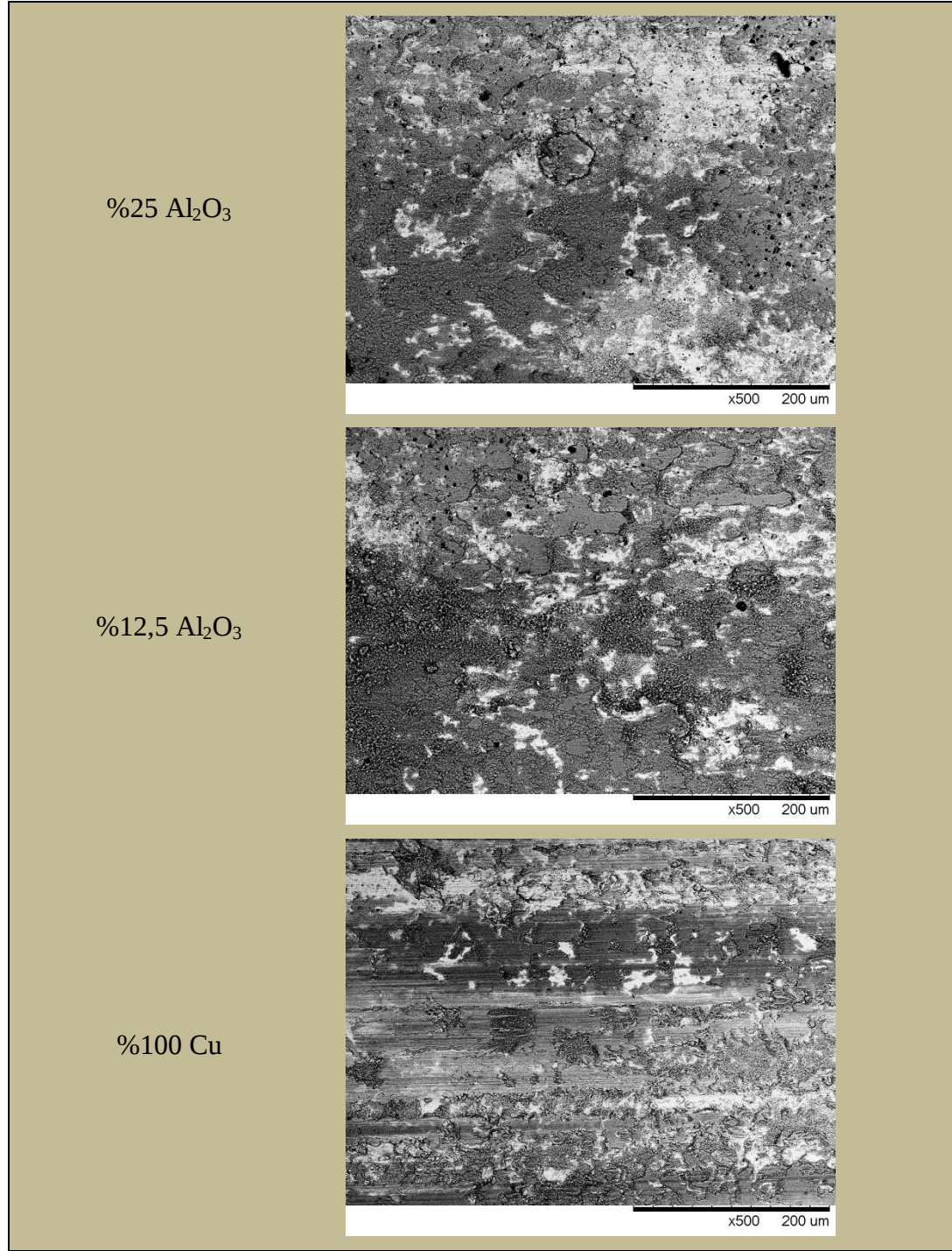
Şekil A.4 : Hacimce %25 Al₂O₃ içeren kaplamaların değişik ısıtım şartlarındaki sürtünme katsayıları



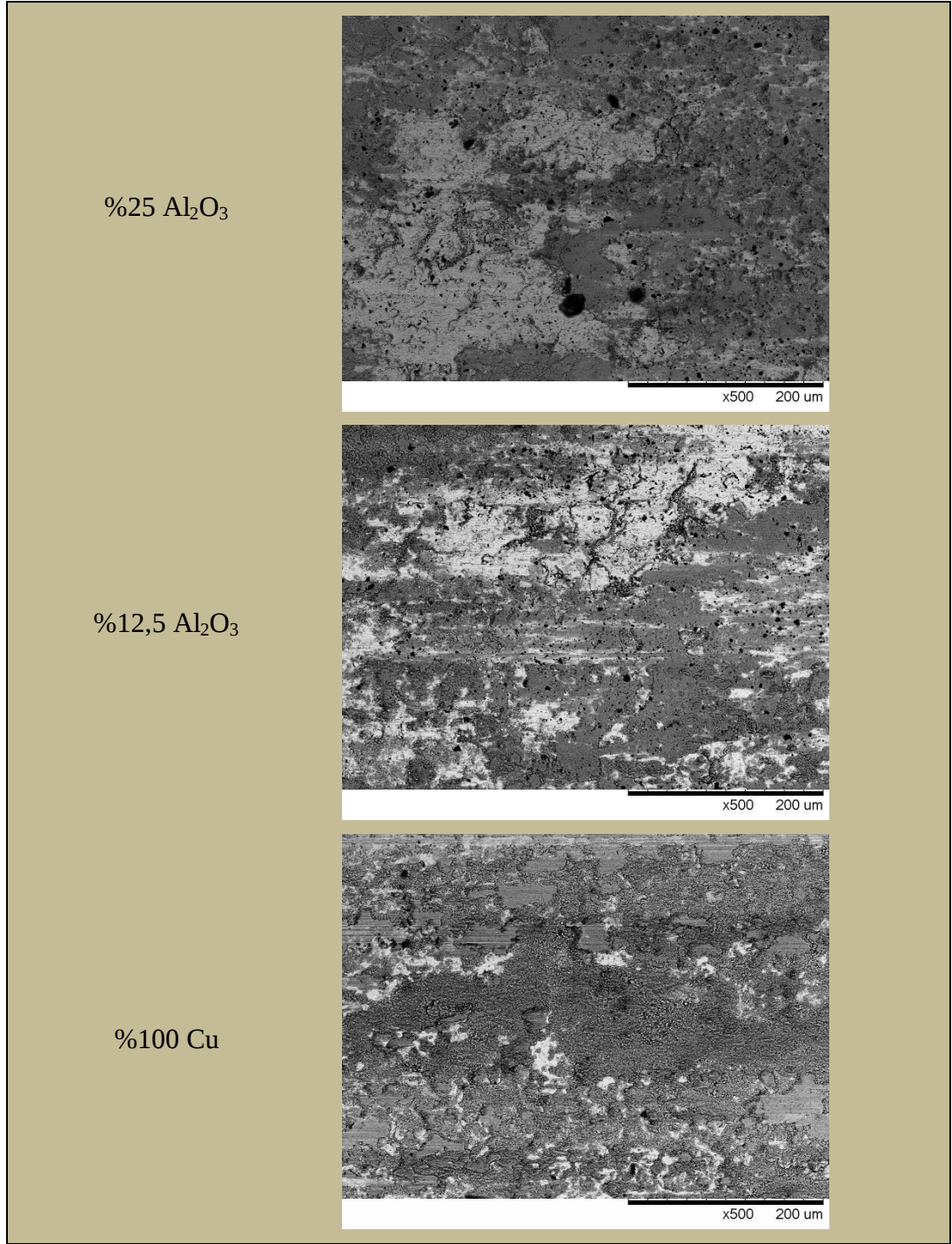
Şekil A.5 : Hacimce %12,5 Al_2O_3 içeren kaplamaların değişik ısııl işlem şartlarındaki sürtünme katsayıları



Şekil A.6 : Saf bakır tozları içeren kaplamaların değişik ısııl işlem şartlarındaki sürtünme katsayılar

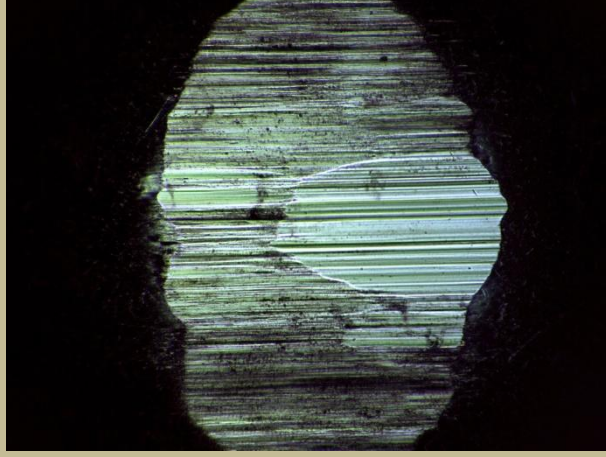


Şekil A.7 : 300°C ısııl işlem uygulanmış numunelerin aşınma izi 500x SEM görüntüleri

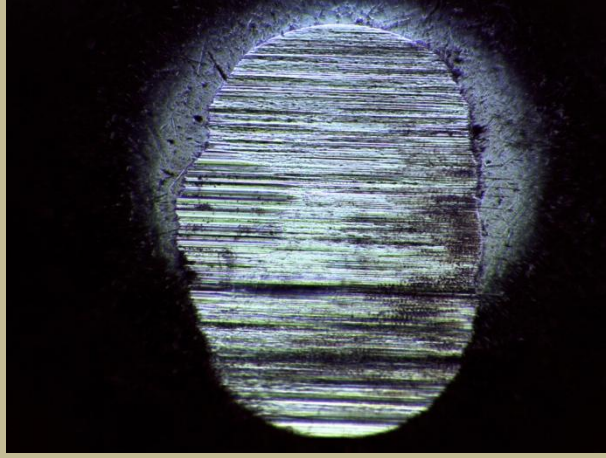


Şekil A.8 : 600°C ısıt işlem uygulanmış numunelerin aşınma izi 500x SEM görüntüleri

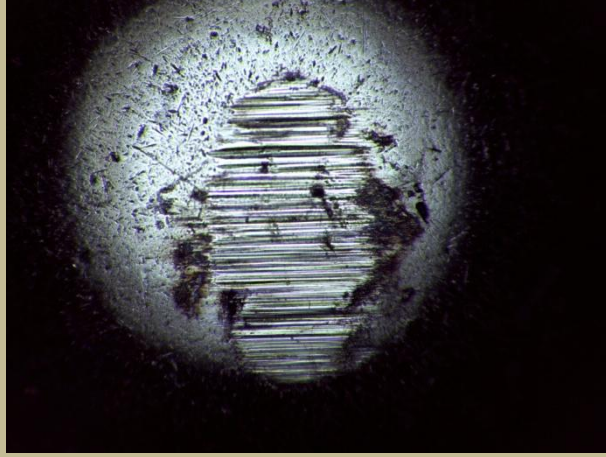
%25 Al₂O₃



%12,5 Al₂O₃

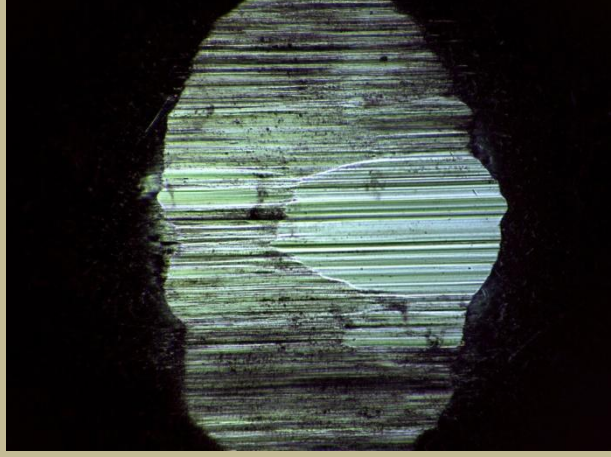


%100 Cu



Şekil A.9 : 300°C ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin aşındırıcı bilyalarında oluşan izin 100x OM görüntüleri

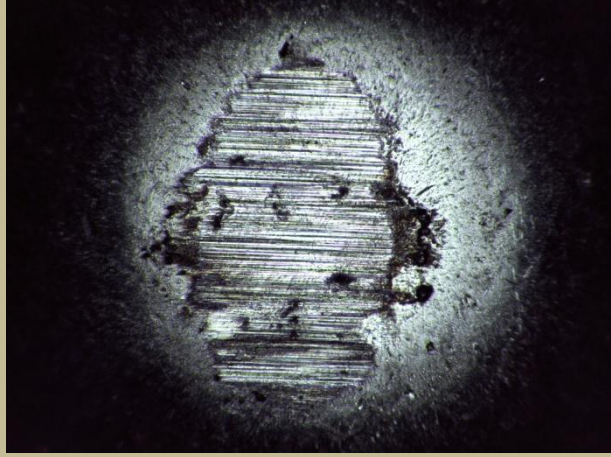
%25 Al₂O₃



%12,5 Al₂O₃



%100 Cu



Şekil A.10 : 600°C ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin aşındırıcı bilyalarında oluşan izin 100x OM görüntüleri

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Görkem YUMUŞAK
Doğum yeri ve Tarihi: Merzifon – 01.01.1988
Adres: Şairarşi Cad. Çoruh Apt. No:43/8 Göztepe-İstanbul
E-Posta: gorkemyumusak@hotmail.com
Lisans: Marmara Üniversitesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü