İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ÜZERİNDE ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE OLUŞTURULAN ÇELİK KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh.Gökhan KİPER

Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME

MAYIS 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ÜZERİNDE ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE OLUŞTURULAN ÇELİK KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Gökhan KİPER
(506991402)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. E. Sabri KAYALI
Prof.Dr. Arif GÜLLÜOĞLU (M.Ü.)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Çalışmalarımızda bizi yönlendiren saygıdeğer hocamız Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI' ya; tezimin hazırlanmasında maddi, manevi her türlü konuda beni sonuna kadar destekleyen değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU' na; en samimi duygu ve saygılarımla teşekkürlerimi sunarım. Numunelerin hazırlanmasında yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Ramazan SAMUR'a teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her safhasında büyük fedakarlıklarda bulunan Araş. Gör. Harun MİNDİVAN' a; yardımlarını almış olduğum sevgili arkadaşlarım, Met. Müh. Gürhan ÖZDABAK, Met. Müh. Ufuk AKIN'a, ve mekanik metalurji laboratuvarında çalışan tüm arkadaşlarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Büyük fedakarlıkla beni yetiştiren aileme, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2003 Met. Müh. Gökhan KİPER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
TABLO LİSTESİ v
ŞEKİL LİSTESİ vi
ÖZET viii
SUMMARY ix

1. GİRİŞ 1
1.1Giriş ve Amaç 1

2. ISIL PÜSKÜRTME 2
2.1. Giriş 2
2.2. Isıl Püskürtme Yöntemleri 8
2.2.1. Alevle Püskürtme Yöntemi 8
2.2.2. Elektrik Ark Püskürtme 10
2.2.3. Plazma İle Püskürtme 11
2.2.4. Yüksek Hızlı Oksit-Yakıt Püskürtme Yöntemi 12
2.2.5. Patlamalı Tabanca ile Püskürtme 13
2.2.6. Vakum ve Soygaz Ortamında Püskürtme 13

3. ISIL PÜSKÜRTME KAPLAMALARDA BAĞLANMA 15
3.1. Bağlanma Mekanizması 15
3.2. Bağ (Ara) Tabakanın Kullanılması 16
3.3. Bağ Dayancını Etkileyen Faktörler 16
3.3.1. Parçacık Sıcaklığı Ve Hızı 17
3.3.2. Yüzey Temizliği 17
3.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü 17

4. ISIL PÜSKÜRTME KAPLAMALARDA GENEL YAPI VE ÖZELLİKLERİ BELİRLEYEN ETKENLER 19
4.1. Porozite 19
4.2. Kimyasal Kompozisyon (Empürite Ve Fazların Dağılımı) 21
4.3. Katılaşma Koşulları 22
4.4. Isı Ve Elektrik İletkenliği 24
4.5. İç Gerilmeler 25

5. AŞINMA 26
5.1. Aşınma Mekanizmaları Ve Aşınmayı Etkileyen Faktörler 27
5.1.1. Adhesive Aşınma 27
5.1.2. Abrasive Aşınma 27
5.1.3. Tribooksidasyon Aşınması 28
5.1.4. Yorulma aşınması 29

5.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler **29**

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **31**
6.1. Kaplama Prosesi **31**
6.2. Kaplamaların Karakterizasyonu **31**
6.3. Aşınma Deneyleri **32**

7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ **33**
7.1. Kaplama Karakterizasyonu Sonuçları **33**
7.2. Aşınma Deneyi Sonuçları **35**

8. GENEL SONUÇLAR **39**

KAYNAKLAR **40**

EKLER **44**

ÖZGEÇMİŞ **52**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. : Oksijen yanıcı gaz oranı.....9
Tablo 4.1. : Aşınmaya dirençli sert alaşımlar.....22
Tablo 6.1. : Kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri.....31
Tablo 6.2. : Kaplama koşulları.....31
Tablo 7.1. : Kaplamaların bazı özellikleri.....33

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Yüzey işlem tekniklerine göre kaplama kalınlığı değişimi.....…3
Şekil 2.2 : Isıl püskürtme kaplama işleminin şematik gösterimi.....…4
Şekil 2.3 : Termal püskürtme yöntemiyle kaplanılmış Tantalumun.....
(a) yüzeyden ve (b) kesittten görünüşü .....…5
Şekil 2.4 : Plazma jetinin geometrisi ve sıcaklık dağılımı .....…..5
Şekil 2.5 : HVOF ile kaplanılmış Fe/Al'un kesit alnının SEM görüntüsü 6
Şekil 2.6. : Yüzeye çarpmış olan Al_2O_3 partikülün görüntüsü.....6
Şekil 2.7. Partikül ve altlık arasındaki etkileşiminin farklı evrelerini gösteren şematik grafik. a) Katı yüzeye yaklaşan küresel damla, b) çarpamadan sonra kristalleşme, c) katılaşmanın sonunda düzleşmiş tabaka.…7
Şekil 2.8. : Isıl püskürtülmüş tabakanın şematik kesiti.....…7
Şekil 2.9. : Isıl püskürtme yöntemleri .....…8
Şekil 2.10. : Alev ile tel, çubuk, şerit püskürtme işleminin şematik görünümü.....8
Şekil 2.11. : Alevle toz püskürtme işleminin şematik görünümü.....…9
Şekil 2.12. : Elektrik ark püskürtme işleminin şematik görünümü.....10
Şekil 2.13. : Plazma püskürtme ile kaplamanın şematik görünümü .....…11
Şekil 2.14 : HVOF ile kaplamanın şematik görünümü.....…12
Şekil 2.15. : Patlamalı tabanca ile püskürtme işleminin şematik görünümü.....…13
Şekil 3.1.: Püskürtme işlemi sırasında oluşan iç gerilmenin şematik görünümü..18
Şekil 3.2. :Yüzey pürüzlülüğünün çekme mukavemetine etkisi.....19
Şekil 4.1. : Porozite-Basınç İlişkisi.....20
Şekil 4.2. : Termal püskürtme yöntemiyle oluşturulmuş kırık yüzeyin SEM görüntüsü.....….21
Şekil 4.3.: Deformasyon sonucu görülen tabaka içindeki kolonsal taneler.....…23
Şekil 4.4. :Basma gerilmesi ile kayma düzlemlerinin yön değişimi.....24
Şekil 5.1.: Bir tribolojik sistemin şematik gösterilişi.....26
Şekil 6.1. :Salınım hareketli (reciprocating) aşınma deney cihazının Şematik görünümü.....32
Şekil 7.1.: a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamaların optik mikroskopta enine kesit görüntüleri.....34

Şekil 7.2.: a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış sert çelik kaplamaların optik mikroskopta enine kesit görüntüleri.....….34
Şekil 7.3. :a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamalarda oluşan aşınma iz alanlarının normal yükle olan ilişkisi.....…..35
Şekil 7.4. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamdaki sert çelik kaplamalarda oluşan aşınma iz alanlarının normal yükle olan ilişkisi.…….36
Şekil 7.5. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamaların aşınma deneylerinde gösterdikleri sürtünme katsayıları ile normal yükün ilişkisi.….....37
Şekil 7.6. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış sert çelik kaplamaların aşınma deneylerinde gösterdikleri sürtünme katsayıları ile normal yükün ilişkisi.....……38
Şekil A.1. : Farklı kayma hızlarında a)Asetilen fazlası b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış sert çelik kaplamanın üç boyutlu görüntüleri (Yük=930 g).....44
Şekil A.2. : Farklı kayma hızlarında a)Asetilen fazlası b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamanın üç boyutlu görüntüleri (Yük=930 g).....45
Şekil B.1.: Asetilen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)...46
Şekil B.2.: Nötr ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).....47
Şekil B.3.: Oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).....48
Şekil B.4. : Asetilen fazlası ortamda kaplanmış sert çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).....49
Şekil B.5. Nötr ortamda kaplanmış sert çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).....50
Şekil B.6. :Oksijen fazlası ortamda kaplanmış sert çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).....51

ÖZET

Birim ağırlık başına mukavemeti yüksek olan alüminyum, başta taşıtlar olmak üzere birçok endüstri alanında kullanılmaktadır Ancak alüminyum, düşük mukavemet ve aşınma direncine sahip olduğu için taşıt motorları gibi aşınmaya maruz kısımlarda kullanılması tercih edilmemektedir.

Isıl püskürtme yöntemi, malzemelerin başta aşınma ve korozyon dayanımı olmak üzere ısıl ve elektriksel özelliklerini de geliştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik, günümüzde uçak motorlarının türbin kanatlarından makine parçalarının onarımı gibi birçok alanı kapsamaktadır. Bu teknik ile hafif ve aşınma dayanımı yüksek, ekonomik kazanç sağlayan dayanıklı ürünler elde etmek mümkündür. Bu çalışmanın amacı alüminyum üzerine ısıl püskürtme yöntemiyle oluşturulan farklı kalitedeki çelik kaplamaların kuru kayma koşullarındaki aşınma davranışlarını incelemektir.

SUMMARY

Aluminium, which has high specific strength (strength/density), is used for aerospace and automobile industrial applications. However, it exhibits low strength and wear resistance. Therefore, it is not used in a vehicle engines that are exposed friction and wear.

Thermal spraying is a process utilized to improve wear resistance, corrosion resistance and thermal, electrical properties. This process is used many applications such as jet engines turbine blades, machine parts restoration. The products that are light, economical, and have high wear resistances, could be provided by this process. In this study, wear behaviour of steel coatings coated on aluminium by a thermal spraying process will be investigated in dry sliding wear conditions.

1.GİRİŞ

1.1. Giriş Ve Amaç

Birim özgül ağırlık başına mukavemeti yüksek olan alüminyum, yakıt tasarrufu sağladığı için taşıtlarda çokça kullanılmaktadır [1]. Bununla birlikte alüminyum düşük aşınma direncine sahip olduğu için motor piston bloklarında istenmeyen boyut değişimi olmaktadır. Yağlayıcı malzeme kullanılsa bile aşınma koşullarında istenilen iyileştirme elde edilememektedir.

Alüminyum yerine demir esaslı malzemelerin kullanılması durumunda çok daha iyi aşınma direnci elde edilmektedir [2]. Bu nedenle, alüminyum parçaların aşınma dayanımını arttırmak için ısıl püskürtme kaplama metodu ile temas yüzeyi kaplanmıştır [3,4,5]. Isıl püskürtme kaplama metodunun ana çalışma prensibi; ergimiş ve/veya kısmen ergimiş malzemeleri kuvvetli gaz basıncı altında altlık malzemeye püskürtme işlemine dayanır [6].

Isıl püskürtme yöntemi ekonomik ve seri üretimi artırma gibi avantajlarının yanısıra birçok malzemeye uygulanabilen modern bir yüzey işlem metodudur [7,8].

Isıl püskürtme yöntemi havacılık endüstrisinden, maden ve kimya endüstrisine kadar birçok endüstri alanında kullanılır. Bu yöntem; malzemelerin aşınma, korozyon dayanımı, elektriksel ve ısıl özelliklerini iyileştirmektedir [9,10,11]. Ancak endüstride en çok aşınma dayanımını artırma amacıyla bu yöntem tercih edilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, dövme yöntemiyle elde edilen ve aynı malzemenin termal sprey yöntemiyle üretilmesi durumunda aynı sertliğe sahip olsalar bile termal sprey yöntemiyle elde edilen malzemenin aşınma direncinin daha yüksek olduğu belirtilmektedir.[12]. Son yıllarda ısıl püskürtme yöntemi ile aluminyumun çelik ile kaplanması halinde aşınma direncinde önemli artış olacağı yönünde bulgular literatürde yer almaktadır.

Bu çalışmada düşük ve yüksek karbonlu iki farklı çelik (Sert yay çeliği ve yumuşak çelik tel) kaplamaların kuru kayma koşulundaki aşınma davranışları incelenmiştir.

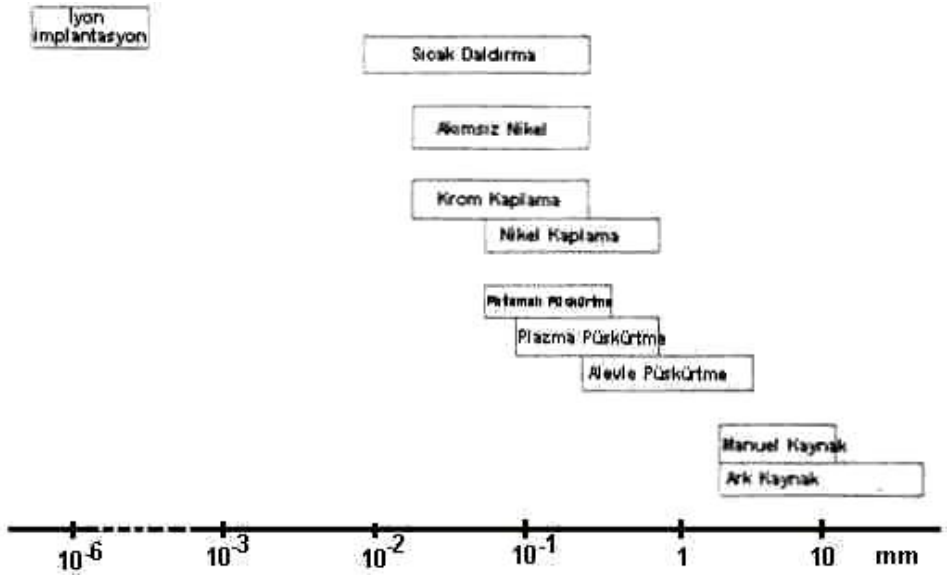
2. ISIL PÜSKÜRTME

2.1.Giriş

Sert kaplama tekniklerinden biri olan ısıl püskürtme tekniği gerek proses çeşitliliği, gerek kullanılabilen malzeme çeşitliliği ve gerekse üreticiye ekonomik katkı sağlayan bir yüzey işleme tekniği olduğundan endüstride geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bunların yanında birkaç mm'den 25 mm'e kadar değişik boyut ve geometriye sahip parçalar bu teknikle kaplanabilmektedir. Isıl püskürtme kaplamaların kalınlığı ise uygulanan proses çeşiti ve kullanılan malzeme cinsine göre değişmektedir. Kaplama kalınlığına bağlı olarak tüm yüzey kaplama tekniklerini karşılaştıran grafik Şekil 2.1'de verilmektedir. Isıl püskürtme tekniğinin ikinci bir önemli avantajı ise kaplanacak malzemeye az ısı vererek onu 100 ^{o}C-260 ^{o}C gibi düşük sıcaklıkta tutabilmesidir. Bu özellik kaplanacak malzemenin ısıl çarpılmasını, oksidasyonunu ve diğer metalurjik özelliklerinin değişmesini önler. Ayrıca ısıl püskürtme ile kaplanan parçalara daha sonra kaynak, ısıl işlem gibi yüksek sıcaklık işlemleri uygulanabilir.

Isıl püskürtme kaplamalar piston ringleri, yataklar, taşıyıcılar, taşıyıcı ekipman, ekstrüzyon kalıpları, transformatör kutusu, gemi tekneleri, tanker kompartımanları, asma köprüler olmak üzere çok geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu çalışmada kullanılan alevle püskürtme çeşiti endüstride öncelikle aşınma dayanımını artırma amaçlı olarak şu alanlarda kullanılır:

- Çelik Endüstrisi
- Maden Endüstrisi
- Çimento ve Beton Endüstrisi
- Kimya Endüstrisi
- Cam Üretim Endüstrisi v.b.



Şekil 2.1. Yüzey işlem tekniklerine göre kaplama kalınlığı değişimi [13].

Bu kullanım yerlerinden olan tipik örneklerden bazıları şunlardır: öğütme, taşlama, contalar, valf parçaları ve cam kalıbı v.b.

Isıl püskürtme tekniğinin malzemede geliştirebileceği özellikler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Aşınma dayanımı,
- Oksidasyon direnci,
- Korozyon dayanımı,
- Isıl yalıtım,
- Elektrik iletkenlik veya elektriksel direnç,
- Biyomedikal amaçlı özellikler

Isıl püskürtme kaplama tekniği ile; tokluğu, sertliği, sürtünme katsayısı ve daha birçok özelliği farklı olan 200'den fazla malzeme kaplanabilir. Bu malzemeler saf metaller, metal alaşımları, sermetler, seramikler, karbitler, polimerler, özel kompozit malzemeler olarak sınıflandırabilir.

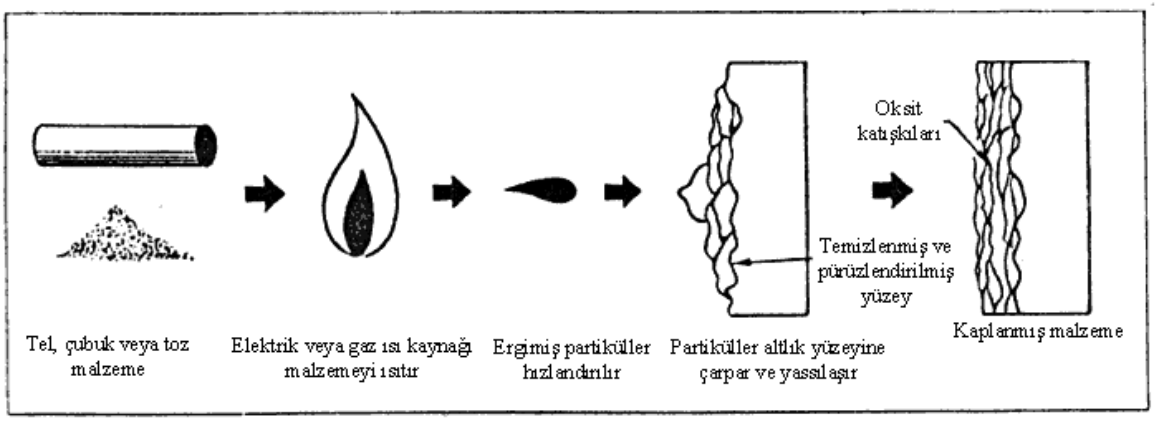
Altlık malzeme ile kaplanan malzeme arasında oluşabilecek kalıntı gerilmelerden mümkün olduğunca kaçınılmalı, parça teknikte kullanılırken oluşabilecek mekanik yüklere dayanabilecek nitelikte olmalı, parçanın spreylenmesi işlemi bu koşullar göz önüne alınacak şekilde yapılmalıdır.

Eğer kaplanan bölge, parçanın teknikte kullanıldığı yerde kayma yüküne maruz kalıyorsa bu tip bir kaplama ısıl püskürtme için uygun değildir. Örneğin vites dişlisi ve hareket dişlileri.

Eğer bölgesel yükler metalik kaplama malzemesine doğrudan etki yapıyor ise; bu bölgesel yükler kaplama boyunca yayılacak ve zamanla kaplamayı alt malzemeden ayıracaktır.Yani yük taşıyan hareketli parça üzerindeki kaplamalar, parça kullanılırken hızla alt malzemeden ayrılacaktır. Örneğin yükleme elemanlarıyla doğrodan temas halinde olan hadde yataklarında ısıl püskürtme kaplamalar kısa bir süre içerisinde ayrılacaklardır.

Altlık olarak nitrürlenmiş malzemeler ısıl püskürtme için uygun değildir. Kaplamak için önce denitrirüzasyon ve sonra yüzeyi eski sertliğine kavuşturmak için kum püskürtme işlemi gerekir [7].

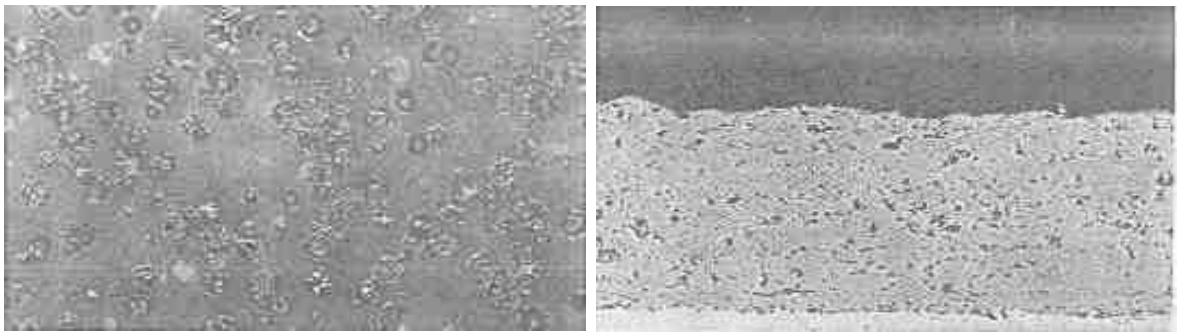
Isıl püskürtme yönteminin ana çalışma prensibi çubuk, tel veya toz halindeki kaplama malzemesinin ergime noktasına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, ergimiş veya kısmen ergimiş damlacıklar halinde basınçlı gaz akımı etkisiyle alt malzeme yüzeyine kaplama esasına dayanır [9].



Şekil 2.2. Isıl püskürtme kaplama işleminin şematik gösterimi [6].

Püskürtülen damlacıkların hızı ve plastikliği, damlacıklar alt malzeme yüzeyine yapışıp şekil alabilecek kadar yüksek değerde olmalıdır. Çarpan damlacıkların yüzeyde aldığı şekil pul pul tabakalar halindedir. Kaplamanın kalınlığı malzemeyi püskürten torcun aynı yerden geçişleriyle artar. Şekil 2.3'de altlık malzemeye çarpmış tabakaların yüzeyden ve kesitten görünüşü verilmektedir. Kaplama kalınlığını oluşturan çok sayıda tabakanın birbiri üzerine yığılması için damlacıkların

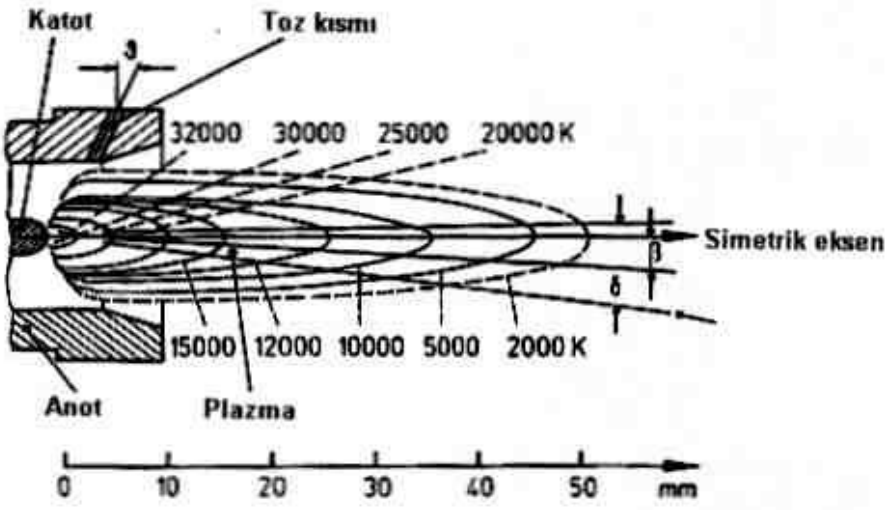
yüzeye çarptığı anda çok hızlı soğuyarak katılaşması gerekir. Böylece sonradan gelen damlacık önceden gelip tabakalaşmış damlacık üzerinde tutunabilir [6].



(a) (b)

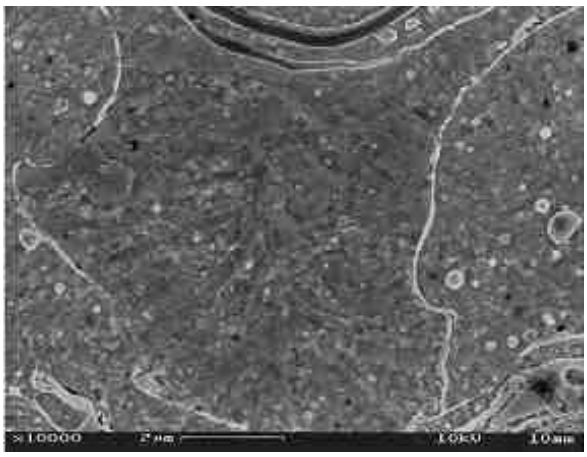
Şekil 2.3. Termal püskürtme yöntemiyle kaplanılmış Tantalumun (a) yüzeyden ve (b) kesittten görünüşü [14].

Kaplama malzemesinin parçacıkları gaz jetinin içinde yol alırken, gaz jetindeki sıcaklık dağılımına ve jet içindeki ortalama parçacık boyutu dağılımına göre ısı alarak tamamen veya kısmen ergir. Şekil 2.4' de plasma jetinin sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.4. Plazma jetinin geometrisi ve sıcaklık dağılımı [6].

Püskürtme esnasında damlacıklar havada sürüklenirken yüksek sıcaklığın da etkisiyle dış ortama karşı korozif açıdan son derece hassas bir yüzeye sahip olurlar. Bu yüzden havadan gelen oksijen yüzünden tabakaların etrafının oksitle çevrelenmiş olduğu gözlenmektedir (Şekil 2.5) [6].



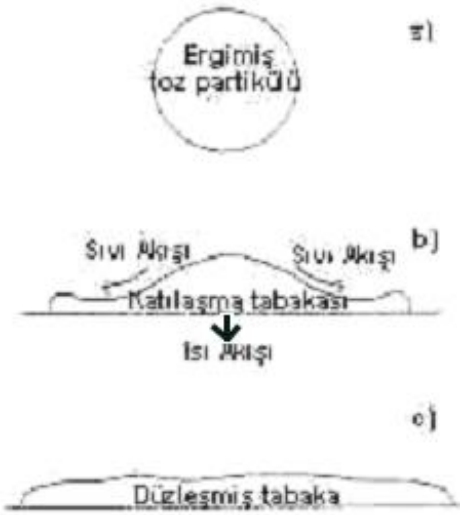
Şekil 2.5. HVOF ile kaplanılmış Fe/Al'un kesit alnının SEM görüntüsü [11].

Yüksek sıcaklık ve kinetik enerjiyle yüzeye çarpan tanecikler, çarpma etkisi ile ani olarak yüzeyde düzleşir. Bu sırada yüksek bir aşırı soğumaya uğrarken çatlama ve kırılmalar görülebilir. Şekil 2.6'da yüzeye çarpmış bir damlacığın tabaka şeklini alırken uğradığı çatlaklar belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 2.6. Yüzeye çarpmış olan Al_2O_3 partikülün görüntüsü [15].

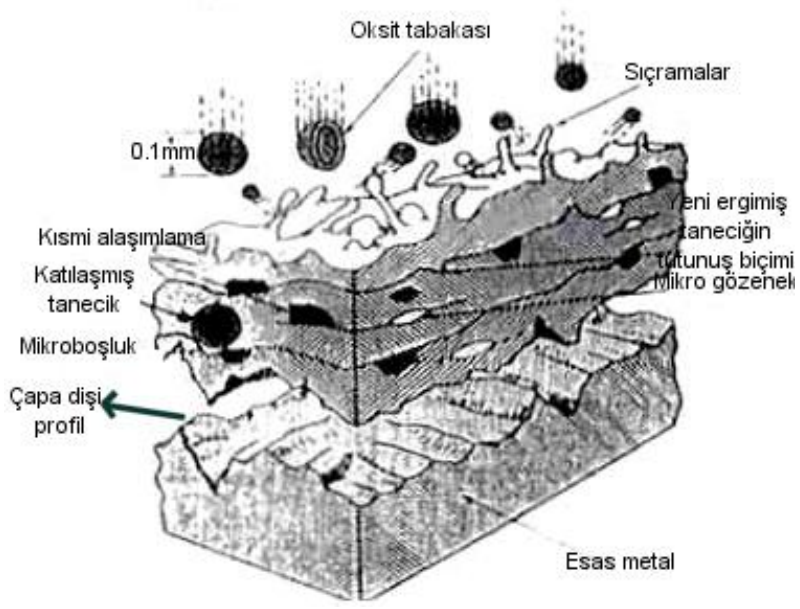
Yüzeye çarpan tanecik radyal bir şekilde yüzeyde yayılma esnasında bir yandan temas alanını artırırken diğer yandan da daha az kütlenin soğumasına (altlık malzemeye dik yönde) neden olduğu için çok yüksek bir aşırı soğuma meydana getirir (Şekil 2.7). Bu arada meydana gelen aşırı soğuma için geçen süre 10^{-8}-10^{-6} sn kadardır.



Şekil 2.7. Partikül ve altlık arasındaki etkileşiminin farklı evrelerini gösteren şematik grafik. a) Katı yüzeye yaklaşan küresel damla, b) çarpamadan sonra kristalleşme, c) katılaşmanın sonunda düzleşmiş tabaka [16].

Ayrıca yüzeye çarpan tanecikler arasındaki zaman farkı yaklaşık 10^{-2} sn kadardır. Böylelikle yüzeye önce çarpan tanecik sonraki gelmeden çok önce katılaşmış olur. Bu ise tabakaların birbiri üzerinde rahatça yığılabilmesini sağlar.

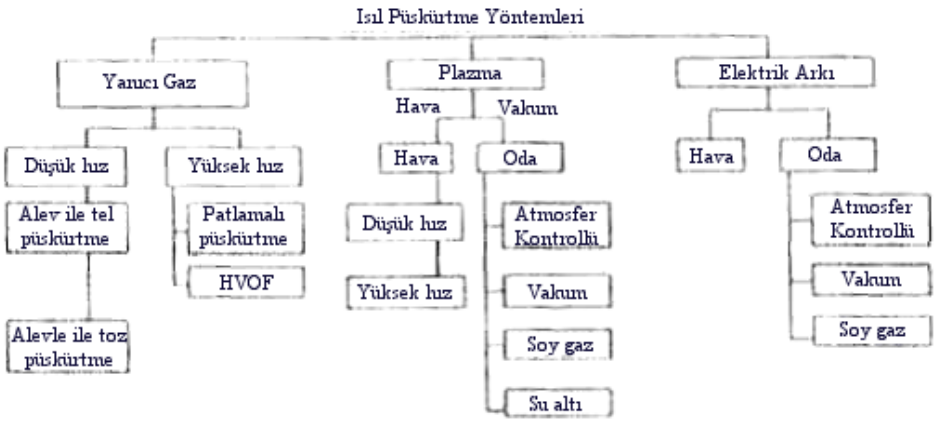
Taneciklerin bir kısmı tamamen ergimeden yüzeye vardığı için kaplamada boşluklu ve ergimemiş yapılar vardır [17]. Ayrıca katılaşma sonrası da oksitlenme devam eder [4]. Şekil 2.8'de kaplama sonrasında oluşan genel yapı görülmektedir.



Şekil 2.8. Isıl püskürtülmüş tabakanın şematik kesiti.[17].

2.2. Isıl Püskürtme Yöntemleri

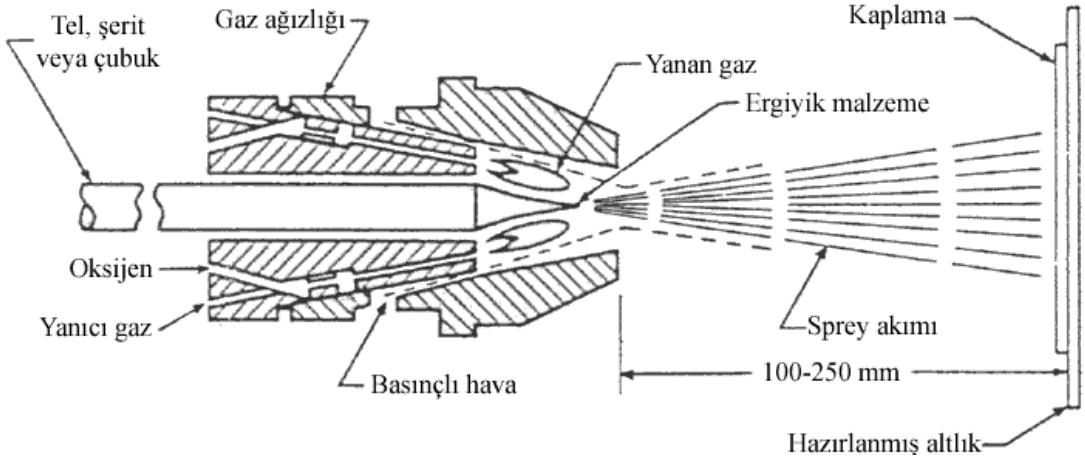
Isıl püskürtme yöntemleri; enerji kaynağı (yanıcı gaz veya elektrik), kaplama malzemesi (tel veya toz) ve kaplama ortamı (hava, düşük basınç veya soygaz) bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler. Şekil 2.9'dan görüldüğü gibi ısıl püskürtme yöntemleri; yanıcı gaz ile püskürtme, elektrik arkı ile püskürtme ve plazma püskürtme yöntemleri şeklinde genel olarak 3 ayrı gruba ayrılmaktadır [17].



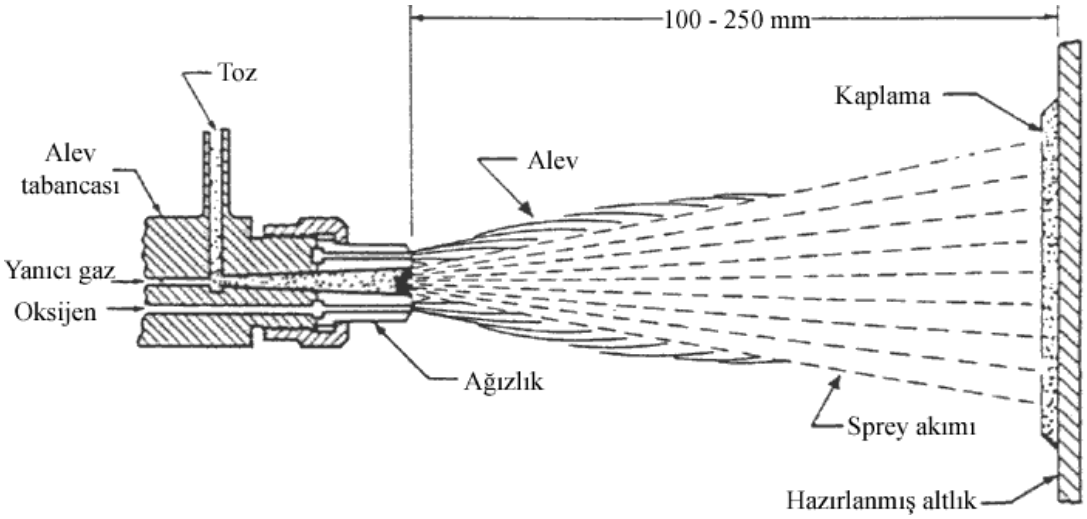
Şekil 2.9. Isıl püskürtme yöntemleri [17].

2.2.1. Alevle Püskürtme Yöntemi

Kaplama malzemesini ergitmek için ısı kaynağı olarak yanıcı gaz kullanılır. Kaplanacak malzeme toz, çubuk veya tel halinde olabilir. Yanıcı gaz oranları uygun üretim masrafları ve kaplama kalitesi göz önünde bulundurularak ayarlanabilir. Asetilen, propan ve oksijen, hidrojen genel olarak kullanılan gazlardır. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de sırasıyla tel ve toz alev tabancaları görülmektedir.



Şekil 2.10. Alev ile tel, çubuk, şerit püskürtme işleminin şematik görünümü [14].



Şekil 2.11. Alevle toz püskürtme işleminin şematik görünümü [14].

Alev sıcaklığı ve karekterestiği, oksijen ve yanıcı gaz oranlarına bağlı olarak Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Oksijen yanıcı gaz oranı [14].

Oksijen/yanıcı Gaz Oranı	**Sıcaklık**		**Alev koşulu**	**Sonuç**
	°C	**°F**		
1:1	3000	5400	Karbür	Yeyersiz ısıtma
1:1	3000	5400	Redükleme	Bazı metaller için iyi
1.1:1	3050	5500	Nötr	Genel kullanım için tavsiye edilen
1.1:1	3350	6000	Oksit	Bazı seramikler için iyi

Alevle püskürtme yönteminde 25-30 MPa bağ mukavemeti, % 10-15 aralığında değişen boşluk oranı ve % 15'e kadar oksit bileşenli kaplamalar elde edilmektedir. Alev sıcaklığı 3000 ^{o}C dolayında, ergimiş damlalar 2000 ^{o}C'nin üzerinde olup yaklaşık 100 m/s hızla altlık malzemeye çarpmaktadır [17].

Alevle püskürtme yöntemi diğer yöntemlere göre düşük bağ mukavemeti, yüksek porozite ve dar çalışma aralığı yanında altlık malzemeye daha fazla ısı aktarma özellikleri gösterir [14].

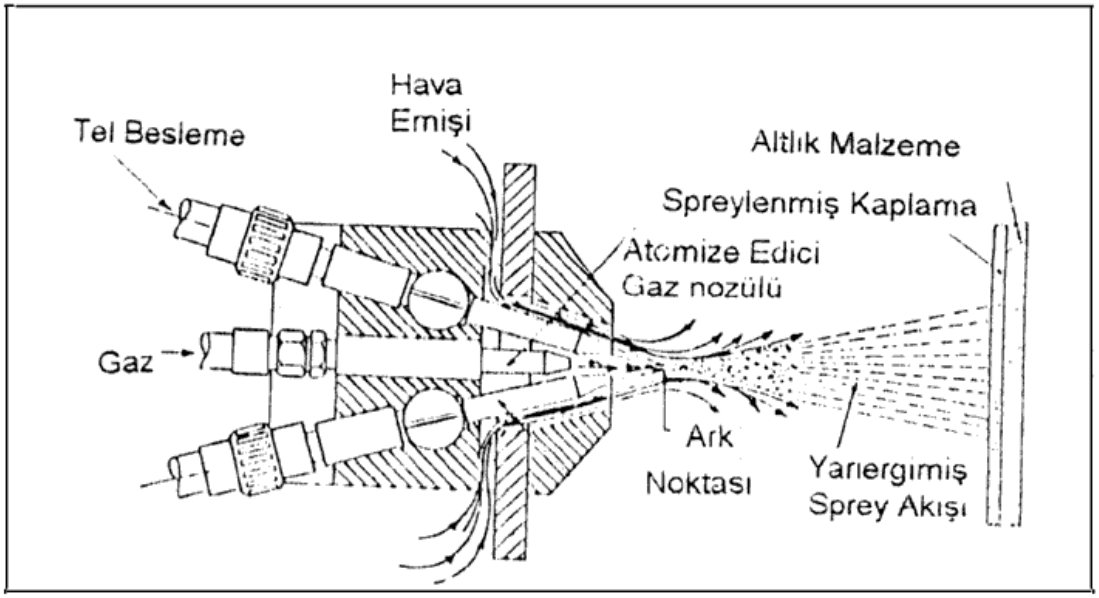
İlk yatırım masrafları ve üretim maliyeti olarak ekonomik bir yöntemdir. Endüstride; şiddetli aşınmayı orta seviyeye azaltmak için, büyük boyutlu yapıların korozyon

direnci dayanımını artırmak için, aşınmış ve boyutsal toleransı uygun olmayan malzemeleri bakım amaçlı olarak kullanılmaktadır [9].

Bu yöntemde kullanılan püskürtülecek malzemeler; östenitik ve martenzitik paslanmaz çelikler, nikel alüminid, bronz, monel, babbitt, alüminyum,çinko ve molibdendir [7].

2.2.2. Elektrik Ark Püskürtme

Bu yöntemin esası; zıt elektrik yüklü iki telin birbirine temas ettiği yerde ark oluşturmak ve oluşan ark ile bu tellerden ergiyen malzemeyi basınçlı hava ile altlık malzeme yüzeyine püskürtme işlemine dayanır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Elektrik ark püskürtme işleminin şematik görünümü [17].

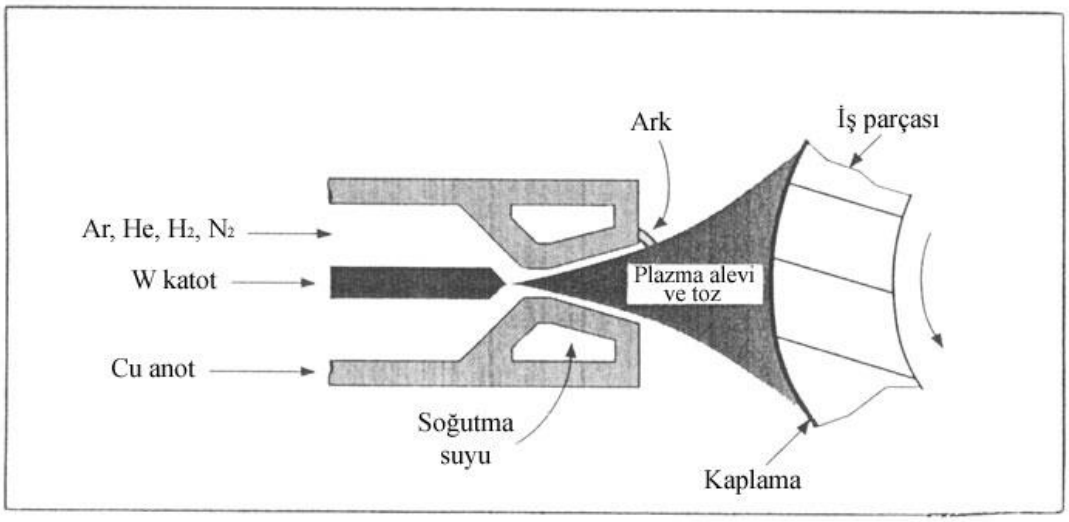
Bu yöntem ile 5500 C'e kadar yüksek sıcaklıklara çıkılabilir. Oluşan mikroyapı alevle püskürtmede oluşan mikroyapıya benzerlik gösterir. Porozite ve oksit içeriği fazladır. Yüksek sıcaklık sayesinde 69 MPa gibi yüksek bağ mukavemeti sağlanabilir [7,9,14].

Düşük üretim maliyeti, hızlı üretim yapabilme gibi avantajlarının yanında alev veya plazma kullanılmadığı için altlık malzemeye az ısı verme özelliği ile tercih edilebilir. Bununla birlikte kaplanacak malzemenin elektriksel olarak iletken olması zorunluluğu en önemli dezavantajıdır [14].

Korozyon direncine karşı, boyutsal onarım ve aşınma dayanımını iyileştirmek için ideal olmasa da tercih edilebilir bir tekniktir [9].

2.2.3. Plazma İle Püskürtme

Plazma püskürtme tekniği Şekil 2.13'de şematik olarak gösterilmiştir. Tungsten katot ve bakır anot arasındaki soy gaz (Ar) oluşturulan elektrik arkı ile iyonize olaral genleşir ve plazma durumuna geçer. Kaplama malzemesi olan tozlar yine bir soy gaz ile plazma jetine enjekte edilir ve altlık malzeme yüzeyine doğru hızla taşınır [12,17].



Şekil 2.13. Plazma püskürtme ile kaplamanın şematik görünümü [12].

Bu yöntem ile plazma jetinin çekirdeğinde 30.000 C'e varan sıcaklıklara ulaşılabilir. Toz parçacıklarının hızı 300 m/s'dir. Oldukça yüksek sıcaklık ve tane hızı, bu yöntemle çok daha iyi mikroyapı ve mekanik özellikler sağlar [12,14].

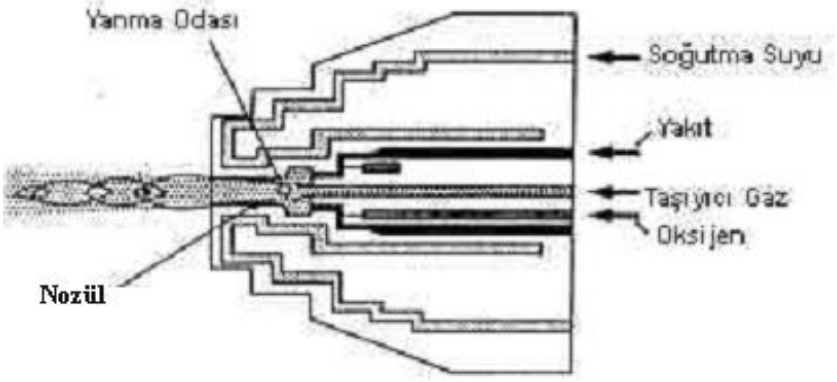
Alev püskürtme ve elektrik ark püskürtme yöntemlerine göre üretim maliyeti plasma arkı ile püskürtme yönteminde daha fazla olmasına karşın, üretim koşullarının sağladığı çeşitlilik ve esneklik ve buna ilaveten yöntemin kaplama malzemesine sağlayabileceği üstün özellikler bu tekniğin endüstride çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmasına sebep olmuştur.

Plazma arkı ile püskürtme yöntemi aşınma dayanımı, korozyon direnci, elektriksel ve termal yalıtım/iletim gibi kaplama özellikleri sağlar [6,9].

Bu yöntem ile yüksek sıcaklıklarda ergiyebilen oksit ve karbürler de kaplama malzemesi olarak kullanılabilir [17].

2.2.4. Yüksek Hızlı Oksit-Yakıt Püskürtme Yöntemi

Bu yöntemin düşük hızda çalışan alevle püskürtme yönteminden temel farkı, oksijen/yakıt gaz karışımının torcun (püskürtme tabancası) içindeki yanma bölümünde yanmasını sağlayarak yüksek gaz basıncı sağlamasıdır. Böylelikle yüksek derecede püskürtme hızı sağlanır (Şekil 2.14). Yanıcı gaz olarak propan, propilen, kullanılır.



Şekil 2.14. HVOF ile kaplamanın şematik görünümü [6].

Bu yöntemde uygulama sıcaklığı 3000 C civarındadır. Toz parçacıklarının hızı 600 m/s'e kadar ulaşabilir [6]. 80 MPa'dan fazla bağ mukavemeti ve % 1'den az boşluk içeren kaplamalar elde edilebilir [17]. Kaplamanın mikroyapı ve mekanik özellikleri plazma arkı püskürtme yöntemindeki kaplamalara benzemekle birlikte daha yüksek yoğunluğa ve daha yüksek bağlantı mukavemetine ulaşılabilir. Bunun sebebi; parçacık hızının yüksek hızlı oksi/yakıt püskürtme yönteminde daha yüksek olmasındandır [12,17].

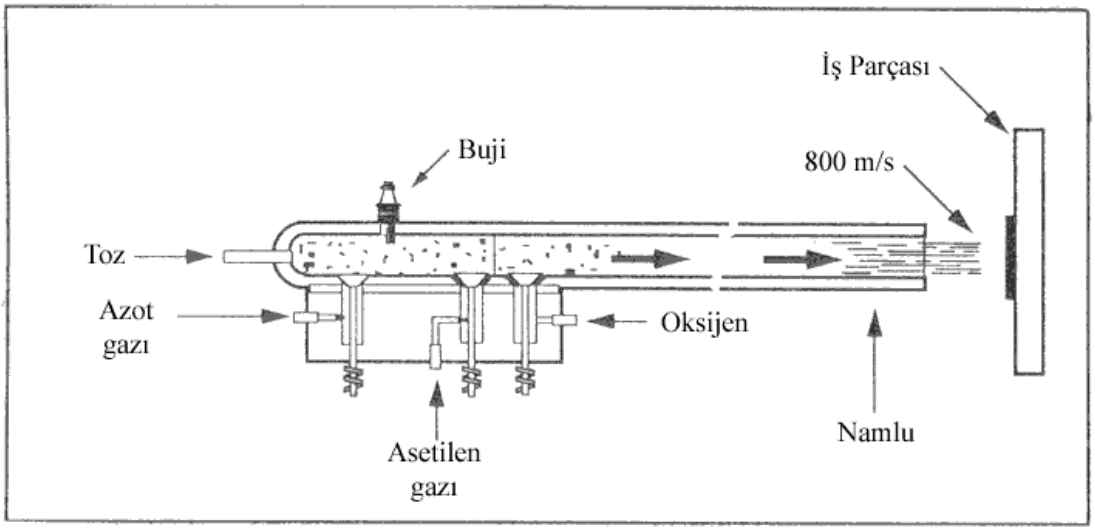
Sağladığı kaplama özelliklerine göre ekonomik bir yöntemdir. Altlığın daha az ısınması bu yöntemin diğer bir avantajıdır [7,17].

Esas kullanım alanları abresive ve kayma aşınmasını önlemek içindir. Su jeti, kesici aletlerin nozülü, kağıt ve folyo üretim endüstrisinde merdaneler, petrokimya endüstrisinde valf ve pompalar kullanıldığı yerlere örnektir.

Özellikle yüksek sıcaklıkta ayrışma gösteren malzemeler için uygun bir yöntemdir. Sert metaller, WC/Co ve Cr_3C_2/NiCr gibi sermetlerin yanında FeNiCo alaşımları, stelit, ve nikel esaslı alaşımlar başlıca kaplama malzemesi örnekleridir [6].

2.2.5. Patlamalı Tabanca ile Püskürtme

Bu yöntemde asetilen ve oksijen tepkime gazları ve taşıyıcı gazla (azot) gelen kaplama parçacıkları yanma bölümü içinde karıştırılarak kıvılcım ile şiddetli patlamalar meydana getirilir. Patlama etkisiyle toz parçacıkları ısı ve yüksek kinetik enerjiyle altlık malzeme yüzeyine püskürtülür.



Şekil 2.15. Patlamalı tabanca ile püskürtme işleminin şematik görünümü [6].

3000 C sıcaklıkta, saniyede 5-10 kere birbiri ardına patlamalar gerçekleştirilir. Patlamalı püskürtmenin diğer yöntemlerden farkı kesiksiz yapılmamasıdır [9,17]. Toz parçacıklarının hızının 900 m/s'e çıkabildiği bu yöntemde taneciklerin yüzeye yüksek kinetik enerjiyle çarpması sonucu tabakalar arası yapışıp kaynaşma çok iyidir.Bu yüzden yüksek bağlantı mukavemetli, yoğun kaplamalar elde edilir [6].

Endüstride çok geniş bir alanda kullanılmasıyla birlikte asıl kullanım yerleri şiddetli aşınma olan ve korozyon dayanımı istenilen alanlardır [9]. Bu yöntemde kaplama malzemesi olarak tungsten karbit gibi sert ve aşınma dayanımı yüksek malzemeler kolayca kullanılabilir [14].

2.2.6. Vakum ve Soygaz Ortamında Püskürtme

Vakum ortamında porozite % 1'in altına düşer. Oksitlenme son derece az olur. Ayrıca atmosfer ortamındaki konvansiyonel ısıl kayıp çok az olduğu için altlık malzeme plazma ile daha çabuk ısınır ve daha geç soğur. Bu ise difüzyon mekanizmasını artırdığından kaplamanın altlık malzemeye daha iyi yapışmasını sağlar, ayrıca soğuma hızı ile oluşan iç gerilmeler çok azalır.

Vakum ve soygaz ortamda yapılan kaplamalar daha yoğun ve daha fazla bağ mukavemetine sahiptirler. Vakum ortamında plazmadaki yüksek sıcaklık bölgeleri daha uzundur. Bu ise parçacıkların daha çok ısınmasını sağlar. Böylelikle bağlantı mukavemeti artar. Düşük sıcaklıkta ergiyen alt malzemeler için konvansiyonel ısı kaybı olması daha iyidir. Bu gibi durumlarda vakum ortamı değil inert gaz ortamı tercih edilir [6]. Kaplamaya atmosferden gelen kirliliklerin bulaşamaması vakum ve soygaz ortamında ısl püskürtmenin diğer önemli avantajları arasındadır [14].

3. ISIL PÜSKÜRTME KAPLAMALARDA BAĞLANMA

Isıl püskürtme kaplamaların kalitesi kimyasal kompozisyon, oluşan faz boyutu ve dağılımı, porozite, mikroyapının üniformluğu ve iç gerilmeler ile belirlenir [18,19].

Isıl püskürtme kaplamaların kalitesini belirleyenleyen faktörler ise enerji kaynağı, püskürtme mesafesi, torc dizaynı, püskürtme ortamı gibi püskürtme şartlarına bağlıdır [6,15,19].

Tribolojik özellikleri iyileştirirken yoğun ve mukavim kaplama sağlanması için; kaplamanın altlık malzemeye iyice bağlanması ve aşınma işlemi sırasında oluşan etkinin kaplamanın alt malzemaden ayrılması şeklinde değil de, daha çok kaplamanın kendisinin aşınmasının sağlanması şeklinde olması gerekmektedir [8]. Bunun yanında ısıl püskürtme kaplamaların endüstriyel uygulamaları büyük ölçüde kaplama ile altlık malzeme arasındaki bağ kalitesine bağlıdır [6].

3.1. Bağlanma Mekanizması

Çarpan parçacıkların hızlı katılaşması sırasında parçacık-(alt malzeme) ve parçacık-(önceden katılaşmış parçacık) arasında yakın temas kurulur. Bu ise 3 çeşit bağ oluşumuna sebep olur.

- **Mekanik Bağlanma:** Ergimiş parçacık, alt malzemeye veya önceden katılaşmış parçacığa çarpıp yayılırken meydana gelir. Parçacıklar pürüzlendirilmiş yüzeye veya kaplanmış malzemeye mekanik kilitlenir.
- **Difüzyon veya Alaşımlanma ile Bağlanma:** Bazı alt malzeme kaplama malzemesi kombinasyonlarında görülür. Ara yüzey sıcaklığı alt malzemenin ergime noktasını aştığı zaman mikro boyutlarda görülen bağlanma şeklidir.
- **Adhesif Bağlanma:** Mikro temasın gerçekleştiği yerlerde görülür. Atomik seviyede yaklaşma sonucu atomik çekim kuvvetin etkisiyle oluşur. Atomik bağın yapısına göre Van Der Waals, kohesif kuvvet, veya valans elektronların değişimi şeklinde olur.

Üretim şekli, kaplama malzemesi ve altlık malzemeye bağlı olarak bu üç bağlanma şeklinden biri veya hepsi meydana gelebilir [6,14]. Örneğin plazma püskürtme kaplamalarda bağlanma şekli mekanik kilitlenme ağırlıklı iken alevle püskürtme

kaplamalarda bağlanma şekli tüm parça boyunca metalurjik bağlanma (alaşımlama, ve atomsal kaynaklı bağlanmalar) şeklinde olur [8,14].

Bununla birlikte; kaplamaların mekanik özelliklerini belirleyen mikroyapısal etkenler üzerindeki görüşler, mekanik özelliklerin bağlanma şeklinden çok gerçek temas alanı ile belirlendiği biçimindedir. Gerçek temas alanının azalmasının adsorblanmış, sıkışmış gaz ve oksit filmler sebebiyle oluştuğu gözlenmiştir [15].

3.2. Bağ (Ara) Tabakanın Kullanılması

Altlık malzeme ile kaplama arasındaki bağlantı ısıl püskürtme kaplamaların en zayıf bağlandığı yer olduğundan, ayrıca korozif gazların kaplamadan alt malzemeye geçişini engellediğinden dolayı kaplamanın kullanım ömrünü uzatmak için kaplama ile alt malzeme arasında bağ tabaka kullanılır.

Bağ tabaka, iyi yapışma özelliği yanında kaplama ile alt madde arasındaki termal uzama ve elastik modül uyumsuzluğunu da azaltması nedeniyle kullanılır.

En çok tercih edeilen bağ kaplama Ni-Al bağ kaplamalarıdır. Ni ve Al'u oksitleyen; nikel-oksit ve alüminadan nikelalüminiti oluşturan ekzotermik reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısının olduğu bölgelerde metalurjik bağ sağlanır [20,21].

Ayrıca Ni-Al'un sünek bir malzeme olması, kaplama ile altlık malzeme arasındaki termal uzama ve elasite modülü faklarının etkisini azaltır [6].

3.3. Bağ Dayancını Etkileyen Faktörler

Parçacik hızı, parçacık boyutu, malzeme kimyası, parçacık sıcaklığı, altlık malzeme sıcaklığı, ve malzemenin temizliği,pürüzlülüğü bağ kuvvetini etkiler [7].

Bununla birlikte kaplama malzemesi ve altlık malzemenin fiziksel özellikleri (yoğunluk, özgül ısı, ısı iletkenliği, sıcaklık iletim özelliği, ergime noktası), kaplama ile altlık malzemenin temas bölgesinin sıcaklığı, arayüzeyde oluşan sert kırılgan intermetalik bileşikler bağ dayancını etkiler [22,23].

Ayrıca tabakalar arasında adsorblanan, sıkışan gazlar, oluşan oksit film ve yüzeye çarpan taneciklerin saçaklanarak serpilmesi gerçek temas alanını azaltır [15]. Küçük boyuttaki parçacıklar düşük poroziteye sebep olurlar. Parçacık sıcaklığı, parçacığın tamamen ergimesini sağlayacak seviyede olursa bağlanma artar [24].

3.3.1. Parçacık Sıcaklığı Ve Hızı

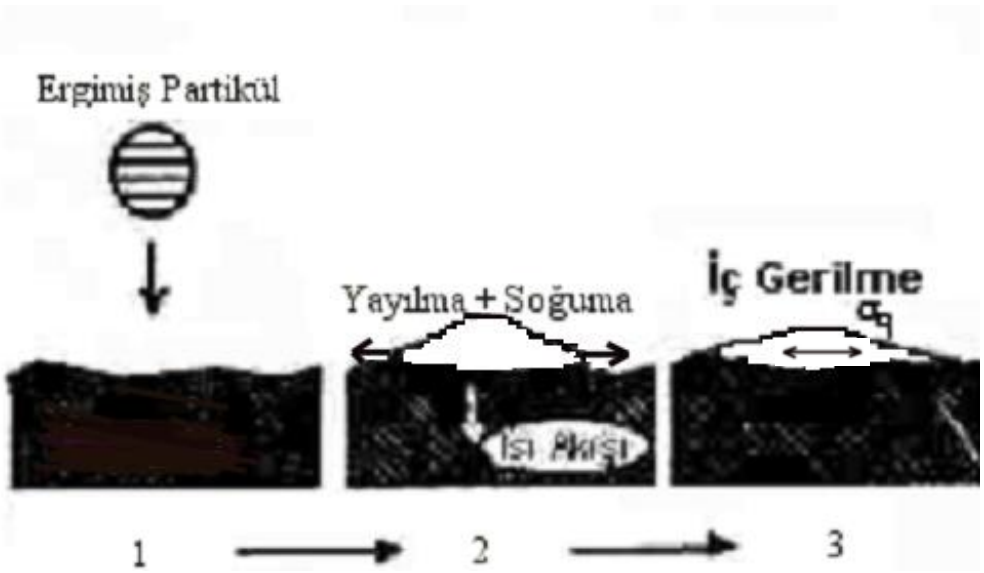
Parçacıklar, çarptığı yüzeyin pürüzlerinden akıp sızabilmesi için yeterli hıza sahip olmalıdır. Bununla birlikte yüksek hızda yüzeye çarpan parçacıkların kinetik enerjisi ısıya dönüşür [24].Yüksek parçacık hızı, alt malzeme yüzeyine yapışma alanı (temas alanı) çevresindeki aerodinamik kuvvetlerin yenilmesini sağlayarak yapışmayı artırır [15].

3.3.2. Yüzey Temizliği

Isıl püskürtme kaplamaların altlık malzemeye iyi bağlanmasının sağlanması için ilk gereklilik altlık malzemenin temiz ve kaplamaya hazır durumda olmasıdır. Bu yalnızca oksitlerin ve yabancı maddelerin değil aynı zamanda yağ, kir v.b.maddelerin de bertaraf edilmesini gerektirmektedir. Bu amaçla altlık malzemelerin uygun çözücüler ile temizlenmesi gerekir [24]. Yüzey temizleme ve pürüzlendirme işleminin bitiminde bir an önce kaplama işlemine başlanmalıdır. Bunun sebebi; hazırlanan yüzeyin oksidasyona, yeniden kirlenmeye karşı aktif durumda bulunmasındandır. Bazı durumlarda yüzeydeki nemi uzaklaştırmak için 150-200 C arasında 60 sn bir ön ısıtma gerekebilir [6]. Ön ısıtma işlemi ayrıca yüzeydeki bağlanma koşullarını iyileştirmek ve ayrıca alt malzeme ile kaplama malzemesi arasındaki arasındaki farklı ısıl genleşmelerin dengelenmesi amacıyla yapılabilir [24].

3.3.3.Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzeye çarpan parçacıklar katılaşırken ve soğurken büzülür. Böyle bir durum ise altlık malzemenin bu büzülmeye direnç göstermesinden dolayı kaplamada çekme gerilmelerine neden olur (Şekil 3.1).

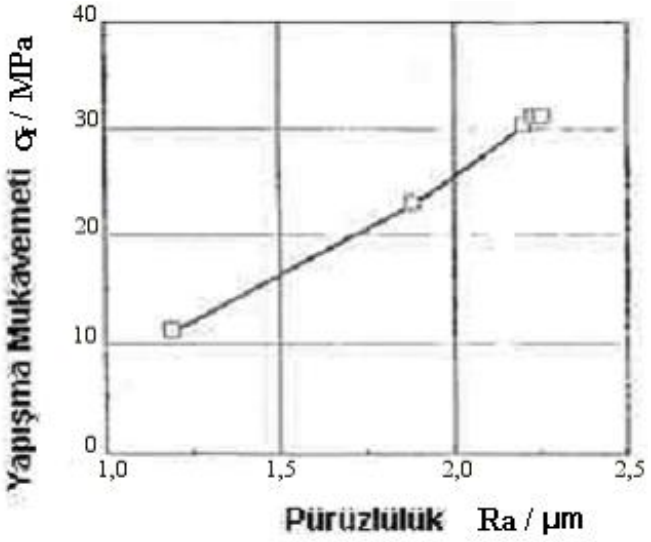


Şekil 3.1. Püskürtme işlemi sırasında oluşan iç gerilmenin şematik görünümü [25].

Yüzeyin ince pürüzlendirilmesi ile soğuyan tabakanın büzülme eğilimi bir ölçüde azaltılır. Pürüzlenen yüzeyin yapışma alanını artırması işlemin diğer bir faydasıdır. İnce pürüzlendirme işlemi, yüzeye ince sert çelik, alümina veya silisyumkarbür aşındırıcı partiküller püskürtmesi ile sağlanır [20,24].

Kaba yüzey pürüzlendirme işlemi çok daha kalın partiküller püskürtme veya talaşlı imalat yöntemiyle oyuklar (maching, grooves) açarak sağlanır. Kaba yüzey pürüzlendirme işlemi ilk olarak çekme gerilimlerini daha küçük bölgelere ayırarak azaltır. Bunun yanında testere dişi şeklinde açılan pürüzler tabakaların bükülmüş şekilde yapılanmasını sağlar. Bu ise; altlık yüzeyine parelel yöndeki gerilimlerin dik yöndeki gerilimlere oranla çok daha büyük olmasından dolayı ara yüzeyde dayanımı artırır.

Ayrıca ara yüzey alanının artması çekme kuvvetine karşı dayanımı artırır [20]. Şekil 3.2'de çelik üzerine plazma plazma püskürtme ile kaplanmış Al_2O_3 kaplamada yüzey pürüzlülüğünün adhesif dayanıma etkisi görülmektedir.



Şekil 3.2. Yüzey pürüzlülüğünün yapışma mukavemetine etkisi [26].

4. ISIL PÜSKÜRTME KAPLAMALARDA GENEL YAPI VE ÖZELLİKLERİ BELİRLEYEN ETKENLER

Daha önce açıklanan "Bağ Mukavemeti" ilave olarak ısıl püskürtme kaplamaların genel yapı ve özelliklerini belirleyen diğer etkenler şunlardır:

4.1. Porozite

Porozite, püskürtme kaplamaların karekterestik bir özelliğidir ve iki tür porozite mevcuttur. Bunlar; çarpan partiküllerin tamamı ile ergimemiş olması halinde çökelen partiküller arasındaki boşlukların eksik doldurulması sonucu yapıda oluşan kaba porozite ve kaplamanın yapısında mevcut olan ince porlardır [24].

Kaplamanın yapısında bulunan ince porların oluşum şartları aşağıdaki denklemlerle incelenebilir.

- Eğer damlacık alt malzemeyi ıslatmazsa (θ>90°);

$$D = \frac{4\gamma Cos\ \theta}{P}, \quad P = \delta v^2 \tag{4.1}$$

Burada; D : Ergiyiğin içine sızabileceği porozite çapı,

P : Efektif basınç,

γ: Sıvının yüzey gerilimi,

θ: Sıvı metal gaz arayüzey açısı,

δ: Sıvının yoğunluğu,

V: Damlaların çarpma hızı,

- Eğer damlacık altlık yüzeyini ıslatırsa (θ< 90 C):

$$Cos\ \theta = r\frac{\gamma_{13} - \gamma_{23}}{\gamma_{12}}, \tag{4.2}$$

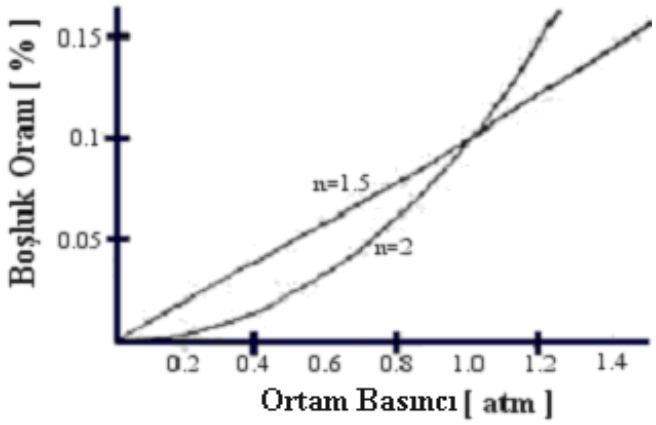
r : Pürüzlülük faktörü,

γ_{13} : Katı-gaz yüzey gerilimi,

γ_{23} : Katı-sıvı yüzey gerilimi,

γ_{12} :Gaz-sıvı yüzey gerilimi,[15]

Ayrıca yapılan bir matematiksel modellemede ortam basıncı porozite ilişkisi Şekil 4.1'de'de görülmektedir(n: politropik üstel).



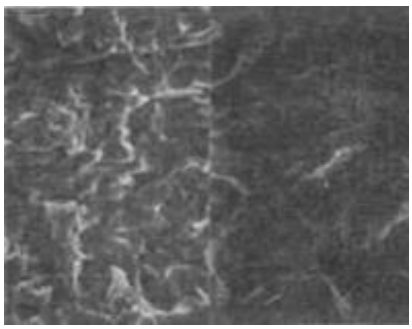
Şekil 4.1. Porozite-Basınç İlişkisi [27].

Yapılan modellemede başlıca kabuller;

- Damlacığın tamamen ergimiş olduğu
- Damlacığın katılaşmadan önce tabaka şeklini almasını tamamlamış olduğudur

Elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir [27].

Porların köşeli şekilde olmasının yuvarlak olmasına göre dayanımı azaltıcı etkisi daha fazladır. Köşeli por oluşumunun nedenlerinden biri de kolonsal kristal şeklinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. (Şekil 4.2)'de görülen kırık yüzeyinde kolonsal kristal gelişiminden oluştuğu tahmin edilen köşeli yapılar görülmektedir.



Şekil 4.2.Isıl püskürtme kaplamada kırık yüzeyin SEM görüntüsü [25].

4.2. Kimyasal Kompozisyon (Empürite Ve Fazların Dağılımı)

Nikel, kobalt ve demir esaslı malzemelere MCrAlY ilavesi yüksek sıcaklık korozyon dayanımını artırır.Yine nikel, kobalt ve demir esaslı malzemelere B, Si, C ilavesi aşınma dayanımını artırır. Birincil ve ikincil karbür ve borür çökeltileri veya oluşan ikili üçlü ötektik fazlar aşınma dayanımını, sağladığı korozyon direncinin de ilave etkisiyle artırır.

Sert alaşımlama için krom,tungsten, molibden ve vanadyum kullanılır. Krom ayrıca aşınma dayanımını artırmak amacıyla da katılır. Karbon, bor ve silisyum; homojen dağılmış sert bileşiklerle beraber sert fazlar oluşturur. Sert alaşımlama kobalt esaslı malzemeler için çok önemlidir. Bu stelit malzemeler, kaynak işleminde veya ısıl püskürtme işleminde demirle sert alaşımlama kadar iyidir.

Nikel sert alaşımlama, özellikle alev püskürtme sonrası yapılan ısıl işlemle birlikte, B ve Si içeriği ile kendinden curuf yapıcı özellik kazanması sayesinde iyi sonuç verir.

CoMoSi (triboaloy) ve NiMo (hasteloy) daha gelişmiş alaşımlama sistemleridir. Bu alaşımlar sünek matriks içinde sert, intermetalik fazlar içerir. Hasteloylar korozyon direnci için geliştirilmiştir. Eklenen Mo sayesinde Ni'in korozyon dayanımı artırılmıştır. Ayrıca NiMo'nin oksidasyona karşı krom ilavesi iyi sonuçlar vermiştir. Tablo 4.1 sert alaşımlar ve onlarla etkileşen diğer alaşımlar gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Aşınmaya dirençli sert alaşımlar [6].

Matris	Metalden Oluşan Sert Faz	Bileşik Oluşturucu	İlave Alaşım Elementi
Fe Esaslı Fe	Cr W Mo	C Si (B)	Mn Ni V
Kobalt Esaslı Co	Cr W Mo	C Si (B)	Ni Cu
Nikel Esaslı Ni	Cr (Mo)	B Si (C)	Fe Cu (Co)

Sert metaller, metalik sert faz ve metalik bağlayıcının kombinasyonu ile oluşurlar, ısıl püskürtmede sert fazlar; WC, W_2C, Cr_3C_2 ve onların sünek bağlayıcıları; nikel ve

kobalttır. WC/Co kaplamaların termal kararlılıkları 550 ^{o}C-600 ^{o}C iken Cr_3C_2/NiCr kaplamaların dayancı 900 ^{o}C'e kadar çıkar.

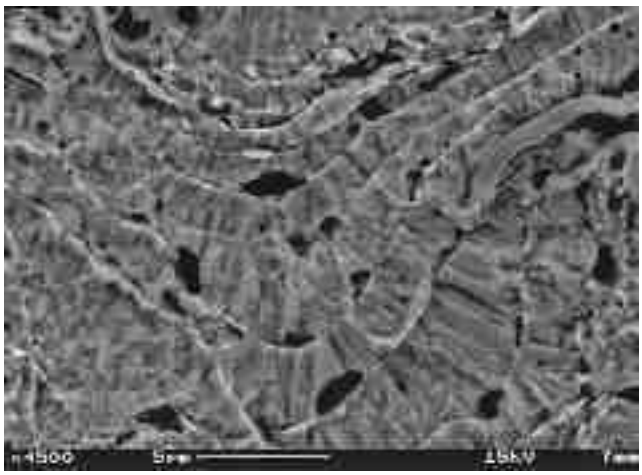
Seramik kaplamalar, seramiklerin sertlik, korozyon ve ısıl direnci sayesinde aşınma ve korozyona dayanım ve ısıl yalıtım amaçlı kullanılırlar [6].

Bunların yanında oksit inkilüzyonlarının homojen olarak dağılımı aşınma dayanımını arttırabilir [28].

4.3. Katılaşma Koşulları

Eğer katılaşma ile alınan ısı fazla olursa, kolonsal kristal gelişimi; soğuma sırasında ısı transferi fazlaysa, hızlı çekirdeklenme sonucu eş eksenli taneler oluşacaktır. Kolonsal gelişmiş taneler Şekil 4.3'de görülmektedir.

Isıl püskürtme kaplamalarda alt malzeme yüzeyine çarpan damlacığın hızı 10^5- 10^6 K/s kadardır. Bu yüksek soğuma hızı tane boyutunun çok küçük olmasına sebep olmuştur. Örneğin plazma püskürtme kaplamalarda tane boyutu (0,25-0,50 μm) kadardır [24].



Şekil 4.3. Deformasyon sonucu görülen tabaka içindeki kolonsal taneler [11].

Isı çekilimi çok fazlaysa (katılaşma ister çekirdeklenme, ister kristal gelişimi şeklinde olsun) kristal gelişim hızı belli bir kritik değeri aşarsa oluşan taneler kolonsal, bu kritik değerin altında ise eş eksenli şekilde olacaktır.

Bazı maddeler katımı (örneğin Al_2O_3'e Y_2O ilavesi) kristal gelişim hızı belli bir kritik değeri aşarsa oluşan taneler kolonsal yerine eş eksenli tane oluşumuna sebep olabilir. Bu olay Y_2O_3'ün katı-sıvı arayüzeyine difüzyonu sebebiyle gerçekleşir.

Bazı durumlarda parçacığın yüzeye çok hızlı çarpması sonucunda oluşan termodinamik dengesizlik, çarpan parçacığın yüzeye doğru yayılması esnasında yayılmakta olan parçacık çeperinde yer yer katılaşma olması nedeniyle, saçaklı çeper yapısı meydana getirir [15].

Ayrıca altlık malzeme yüzeyine dik yönde ısı geçişi olduğundan alt malzemeye ilk temas eden parçacıkta alt malzemeden itibaren, ısı geçişine ters yönde kristal gelişimi başlayacaktır. Bu ise kristal yapısındaki sıkı paket düzlemin ilk oluşan kristal düzlemi olmasıyla gerçekleşir. Bunun nedeni ise sıkı paket düzlemin en az yüzey enerjisine sahip olmasıdır. Böylece kristal gelişimi tüm katılaşan parçacık boyunca başladığı şekilde devam edecektir.

Bununla birlikte aşırı soğuma çok fazla olursa yapının amorf olacağı ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır.

Kristal dokusu oluşumunda soğuma şartlarından başka çarpan taneciklerin uğradığı plastik deformasyon da etkilidir. Çarpma ile yüzeye dik yöndeki basma kuvvetleri etkisiyle oluşan plastik deformasyon, aynı zamanda sıkı paket düzlemi olan kayma düzlemlerini, basma kuvvetine karşı karşı 45 ^{o}C'lik yönden yüzeye parelel olacak yöne (basma kuvvetleri ile sıkı paket kayma düzlemlerinin normali arasındaki açı 0 ^{o}C olacak şekilde) doğru yönlendirecektir. Bu yönelmenin amacı kayma düzlemlerinin basma kuvvetlerine karşı kararlı bir hal alma isteğidir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Basma gerilmesi ile kayma düzlemlerinin yön değişimi [16].

Sonuçta altlık yüzeyine parelel yönde sıkı paket düzlemli kristal doku yapısı oluşacaktır [16].

4.4. Isı Ve Elektrik İletkenliği

Isıl püskürtme kaplamaların ısı ve elektrik iletkenliği aynı malzemenin kompaktlanmış halinden düşüktür. Isı ve elektrik iletkenliği kaplamalarda yüzeye parelel yönde, dik yöndeki duruma göre daha fazladır. Bu ise kaplamadaki lamelli yapıdan kaynaklanmaktadır (lameller arasında boşluklu yapı, lameller çevresinde oksit tabaka bulunuyordu). Lameller arasındaki bağlantının iyi olması ısı iletkenliğini artıracaktır [29,9].

Isıl yalıtkanlık ve ısıl şok dayanımları için daha çok seramik esaslı kaplamalar kullanılırken elektriksel iletkenlikte metal esaslı kaplamalar kullanılır. Elektrik iletkenliği nedeniyle kullanıldığı yerlere daha çok, aşınmanın da bulunduğu yerlerdir [9].

4.5. İç Gerilmeler

Isıl püskürtme kaplamalarda iç gerilme oluşumunun başlıca sebebi alt malzeme ile kaplama malzemesinin ısıl genleşme katsayıları arasındaki farktır. Soğuma sırasında kaplamanın ısıl uzama katsayısı alt malzemenin ısıl uzama katsayılarından fazlaysa çekme gerilimi biçiminde iç gerilmeler, tersi durumda basma biçiminde iç gerilmeler oluşacaktır. Buna ilaveten iç gerilmelerin belirlenmesinde gerçek elastisite modülü (poroziteler hesaba katıldıktan sonra görünen elastisite modülünüm artırılmış değeri) de belirleyici faktördür [19].İç gerilmeler kaplama kalınlığıyla beraber çatlak oluşmadıkça artar [9]. Bu yüzden seramikler için kullanım kalınlığı 0.2-0.5 mm iken, termal uzama farkının daha az olduğu metal kaplamalarda birkaç mm ile sınırlıdır [8]. Parçacıkların aşırı soğuması, soğuma sırasında oluşan fazların farklı hacimde olması iç gerilmelerin başka nedenleridir. Aşırı soğuma her zaman çekme gerilmeleri biçiminde iç gerilmeler oluşturur [16].

Ayrıca; iri boyutta tozlar kullanılması porozite miktarını artırmasına rağmen soğuma hızını azalttığı için düşük miktarda iç gerilmelere neden olur [6].

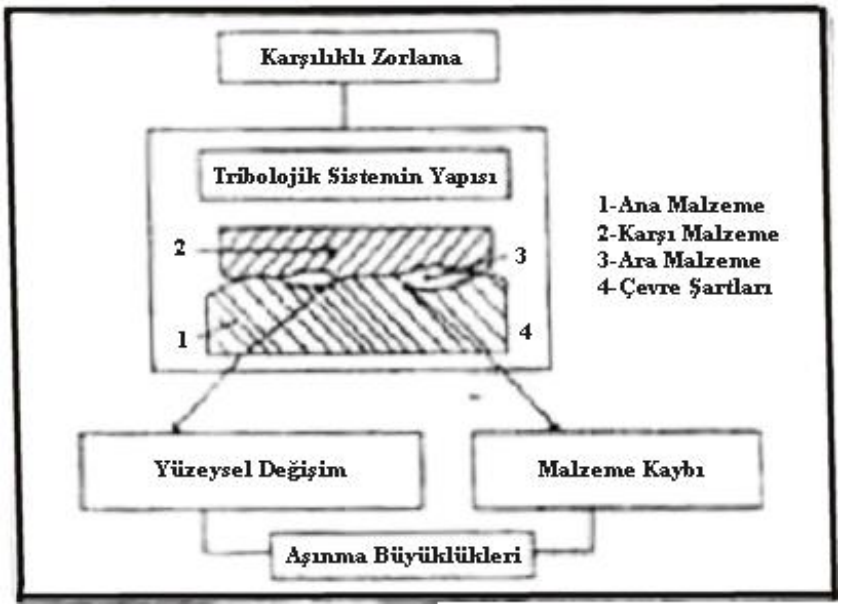
5.AŞINMA

Teknikte aşınma denilince, katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenlerle sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkması anlaşılmaktadır.

Bir aşınma sisteminde;

- Ana malzeme (Aşınan) ,
- Karşı malzeme (Aşındıran) ,
- Ara malzeme ,
- Yük ,
- Hareket ,

aşınmanın temel unsurlarıdır. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte "Tribolojik Sistem" diye adlandırılır. Bir tribolojik sistemin standartlara uygun şematik olaral gösterimi Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1.Bir tribolojik sistemin şematik gösterilişi.

5.1. Aşınma Mekanizmaları Ve Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Daha önce de belirtildiği gibi, aşınma tribolojik sistemin elemanları arasında karşılıklı zorlamalar neticesinde meydana gelir. Aşınmanın tanımı çok geniş olup, çeşitli aşınma tipleri ve farklı sınıflandırılmaları yapılmaktadır. Burada aşınma mekanizmaları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır.

1. Adhesiv aşınma ,
2. Abrasive aşınma ,
3. Tribooksidasyon aşınması ,
4. Yorulma aşınması'dır .

5.1.1. Adhesive Aşınma

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhesiv aşınma, en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhesive aşınma bir metal yüzeyinin bir başka metal yüzeyindeki bağıl hareketi sırasında birbirlerine kaynamış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar. Özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçacıkları yumuşak olan metalden kopar. Eğer iki metal aynı sertlikte ise aşınma her iki yüzetde de oluşur. Metaller arasındaki yağlamanın mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması adhesive aşınmayı azaltır. Sonuç olarak adhesive aşınma; yüzeye etki eden normal yük, kayma yolu ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır.

5.1.2. Abrasive Aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasive aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasive aşınma biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbirleriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana gelir. Sert parçacıkların yumuşak metale batması abrasiv aşınmaya neden olabilmektedir.Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışardan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma tarzı verilebilir.Abrasiv aşınma hızı malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak

kaldırılması sırasında daha az iz bırakması sağlanır. Malzeme açısından abrasiv aşınmayı azaltmak için;

1. Daha sert alaşım kullanmak ,

2. Sertlik artırmak amacıyla ısıl işlem uygulamak ,

3. Malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplamak (nitrasyon, elektro kaplama, metal püskürtme v.b. gibi yöntemler uygulayarak).

tavsiye edilir. Bu önlemlerle abrasive aşınma hızını azaltmak mümkündür.

Abrasiv aşınma endüstriyel cihazlarda malzeme kayıplarının başlıca sebepleridir. Aşındıran malzeme serbest halde iki metal arasında bulunuyorsa veya yalnız bir metali aşındıran sabit veya serbest taneler mevcut ise bu durumda;

1.İki elemanlı abrasiv aşınma,

2.Üç elemanlı abrasive aşınma,

şeklinde guruplandırılması mümkündür. İki elemanlı abrasive aşınma sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasive aşınmada ise ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeyden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir.

5.1.3. Tribooksidasyon Aşınması

Tribooksidasyon denilince ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon anlaşılır. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerinin bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ gibi kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlanmalarla kırılması ve aşındırıcı parçacıklar oluşturması aşınmayı hızlandırmaktadır. Tribooksidasyon özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür.

5.1.4. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması değişken, tekrarlı yükler sonucu ortaya çıkar tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden yorulma aşınması bir çok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu da yüzeyden ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur.

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınma daha ziyade dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür.

5.2.Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler aşağıda dört gurup halinde verilmektedir [30].

1.Ana malzemeye bağlı faktörler

- Malzemenin kristal yapısı
- Malzemenin sertliği
- Elastside modülü ,
- Deformasyon davranışı
- Yüzey pürüzlülüğü
- Malzemenin boyutu

2.Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi

3.Ortamın etkisi

- Sıcaklık
- Nem
- Atmosfer

4.Servis koşulları

- Basınç
- Hız
- Kayma yolu

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Kaplama Prosesi

Bu çalışmada ticari saflıktaki alüminyum üzerine alevle püskürtme yöntemiyle üç farklı ortamda (asetilen fazlası, nötr, oksijen fazlası) yumuşak çelik (düşük karbonlu) ve sert çelik (yüksek karbonlu) teller kullanılarak kaplama yapılmıştır. Kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri, Tablo 6.1'de verilmektedir. Tablo 6.2'de kaplama koşulları görülmektedir. Çelik kaplamaların alüminyum altlık malzemeye daha iyi tutunmasını sağlamak üzere Ni-Al ara bağlayıcı tozu ile ön kaplama yapılmıştır.

Tablo 6.1. Kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri.

Malzeme	Kimyasal Bileşim (% Ağırlık)
Yumuşak Çelik	% 0.084 C, % 0.009 S, %0.34 Mn, % 0.06 Si,
Sert Çelik	% 0.59 C, % 0.004 S, % 0.5 Mn, % 0.224 Si,

Tablo 6.2. Kaplama koşulları.

Kaplama	Koşul	Asetilen (Bar)	Akış(m/s)	Oksijen (Bar)	Akış (m/s)
Yumuşak Çelik	Asetilen	1	30	2	25
	Nötr	1	28	2,5	28
	Oksijen	0,8	23	3	30
Sert Çelik	Asetilen	1	30	2	25
	Nötr	1	28	2,5	28
	Oksijen	0,8	23	3	30

Tel ilerleme Hızı : 118cm/dk, Püskürtme açısı: 90°, Püskürtme mesafesi:20 cm, Hava basıncı : 4,5 Bar

6.2. Kaplamaların Karakterizasyonu

Kaplamaların karakterizasyonu; yüzey pürüzlülüğü ölçümü, metalografik inceleme ve mikrosertlik ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir.

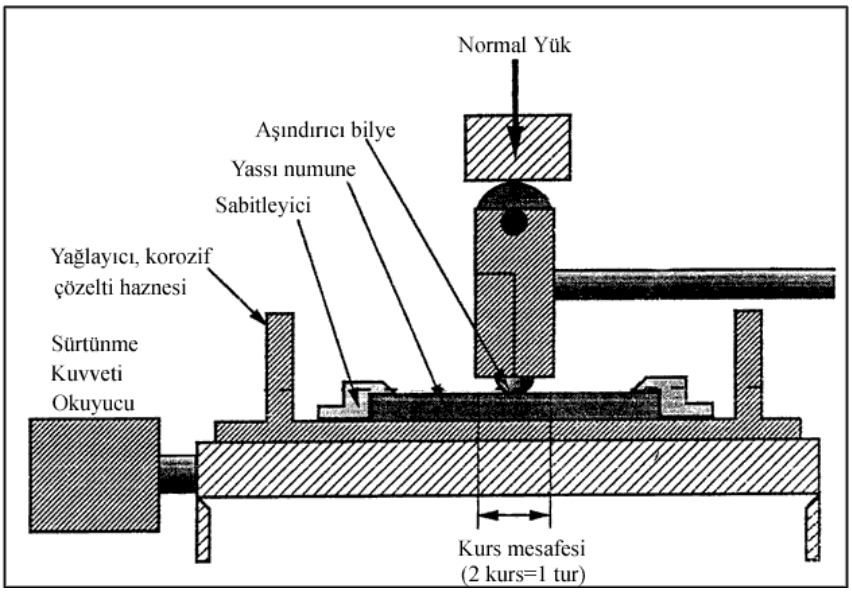
çelik kaplamaların yüzey pürüzlülükleri Perthometer SP tipi cihaz kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) cinsinden ölçülmüş olup iki ölçümün ortalaması dikkate alınmıştır. Metalografik incelemeler numunelerin kalınlık kesitinde, numuneler bakalite alındıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bakalite alınan numuneler standart yöntemlerle zımparalanıp parlatılmış ve optik mikroskopta incelenmiş ve kalınlıkları ölçülmüştür. Kaplamaların sertlikleri metalografik numuneler üzerinde Wılson Tukon marka mikrosertlik cihazında, Knoop ucu

kullanılarak 300 g. yük ile belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri 10 ölçümün ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

6.3. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri salınım hareketli (reciprocating yada ball-on-flat) aşınma test cihazında (Şekil 6.1) kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sırasında karşı malzeme olarak 10 mm çapında alümina bilye kullanılmıştır. Aşınma deneyleri bittikten sonra ise aşınma izlerinin yüzey profilleri Perthometer SP tipi cihaz ile dört kademede ölçülmüştür ve yüzey profilleri vasıtasıyla aşınma iz alanları hesaplanmıştır.

Kaplamalar, aşınma deneyine başlanmadan önce 1000 gritlik zımpara ile zımparalanmıştır. Altlık malzeme için böyle bir işlem yapılmamıştır. Aşınma deneyleri 20±2 ^{o}C sıcaklık ve %40±2 nem seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1. Salınım hareketli (reciprocating) aşınma deney cihazının şematik görünümü.

Aşınma deneylerinde üç farklı kayma hızı (0.026-0,056-0,086 ms^{-1}) olup, toplam kayma mesafesi 240 m'dir. Aşınma deneyleri 275, 496, 737 ve 930 g. olmak üzere dört ayrı yük altında yapılmıştır.

Aşınma deneylerinden sonra numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin profili alınarak aşınma alanı hesaplanmıştır. Ayrıca aşınma izleri optik ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir.

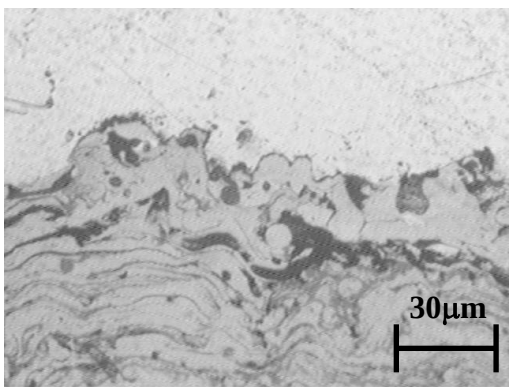
7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

7.1. Kaplama Karakterizasyonu Sonuçları

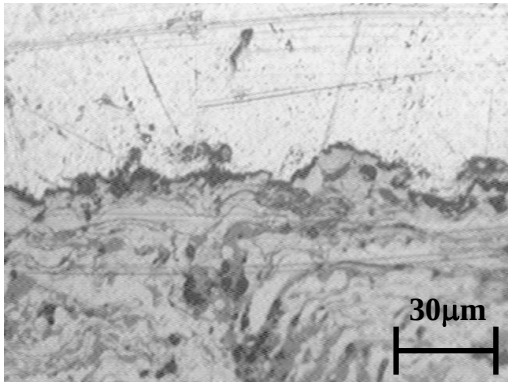
Kaplamaların kalınlık, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri gibi karakteristikleri Tablo 7.1'de verilmiştir. Asetilen fazlası ortamda yapılan kaplama işlemlerinde, yüksek karbonlu çelik en sert, düşük karbonlu çelik ise en yumuşak kaplamayı oluşturmuştur. Metalografik çalışma sonrası kaplamaların kalınlık kesitlerinden alınan optik mikroskop fotoğrafları yumuşak çelik için Şekil 7.1, sert çelik için Şekil 7.2'de verilmiştir. Bu resimlerde altlık malzeme, ara bağlayıcı tabaka ve kaplama tabakaları bir arada görülebilmektedir. Bu mikroyapıda açık gri renkli bölgeler matrisi, koyu gri renki bölgeler demir oksit bölgeleri, siyah bölgeler ise poroziteyi göstermektedir. İncelenen kaplama koşullarının hepsinde, sert çelik kaplamalarda yumuşak çelik kaplamalara nazaran daha yüksek porozite bulunmaktadır. İncelenen kaplamaların kalınlıkları 350 ila 700 μm arasında değişmektedir.

Tablo 7.1. Kaplamaların bazı özellikleri.

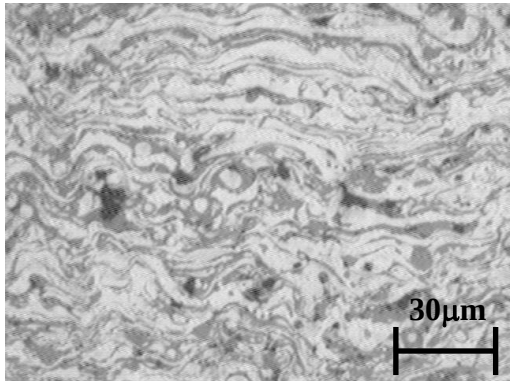
Kaplama	**Koşul**	**Porozite (%)**	**Sertlik $HK_{0.3}$ (Kg/mm^2)**	**Ortalama Kalınlık (μm)**	**Yüzey Pürüzlülüğü R_a (μm)**
Yumuşak Çelik	Asetilen	2,4	119	700	11
	Nötr	2,3	161	550	12
	Oksijen	3,5	238	500	12
Sert Çelik	Asetilen	5,2	341	480	15
	Nötr	5,8	318	350	11,5
	Oksijen	5,7	301	600	10,5



(a)

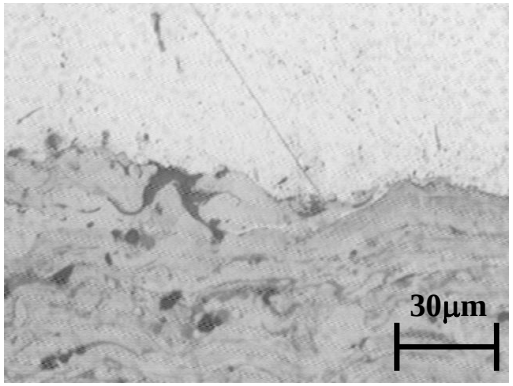


(b)

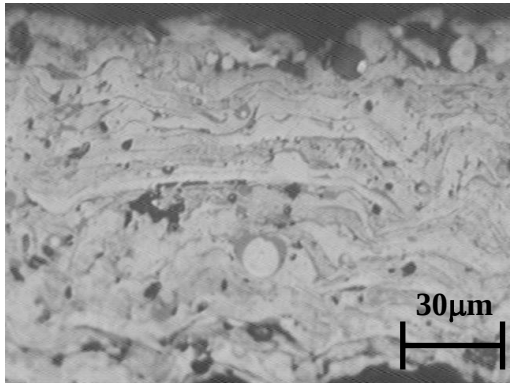


(c)

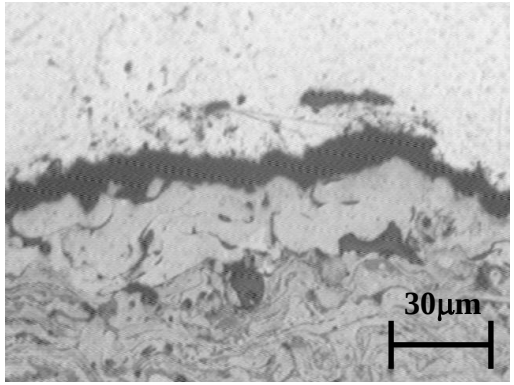
Şekil 7.1. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri.



(a)



(b)

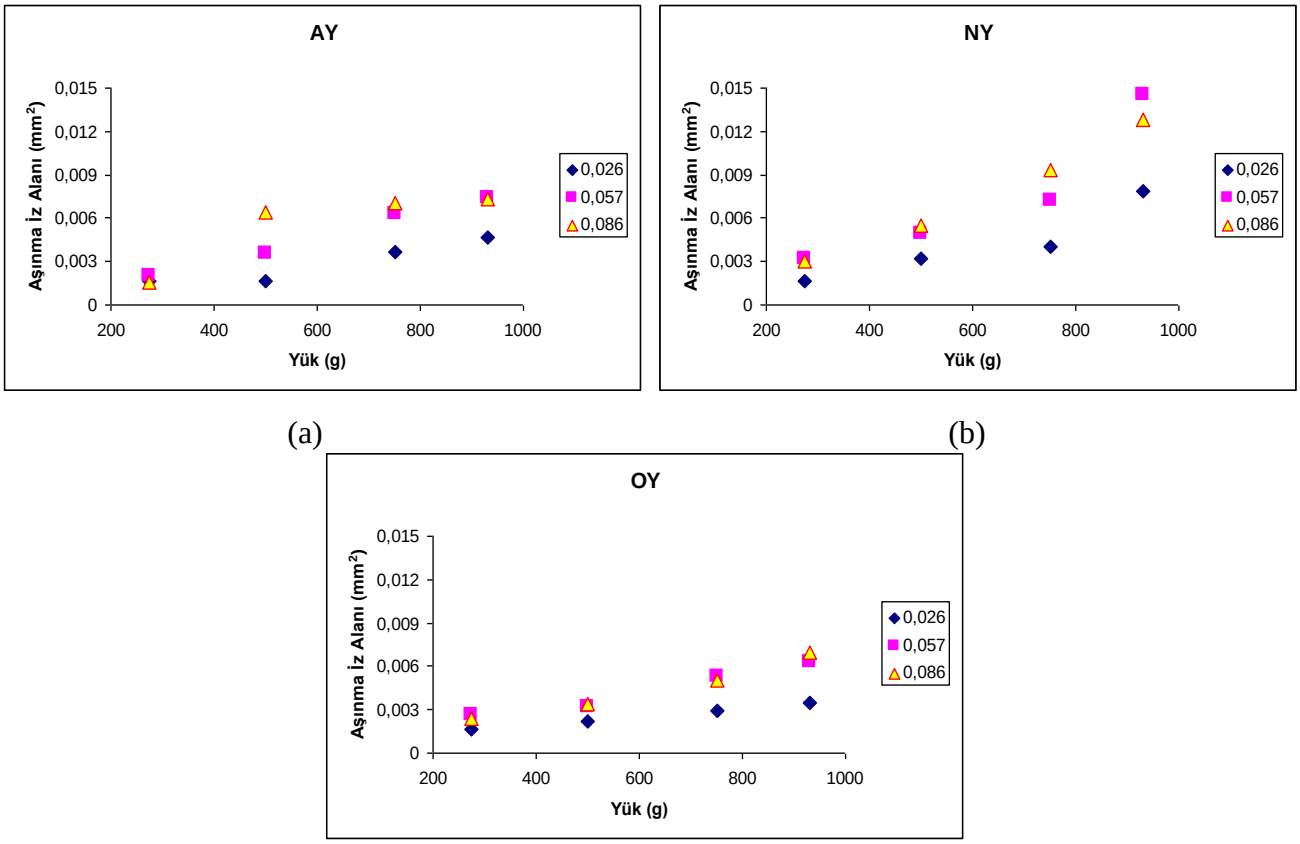


(c)

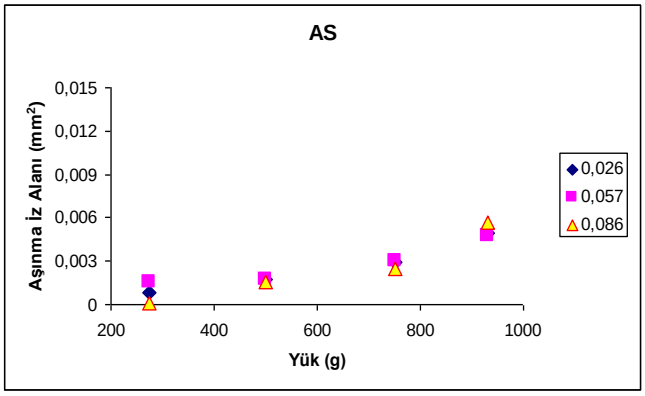
Şekil 7.2. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış sert çelik kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri.

7.2. Aşınma Deneyi Sonuçları

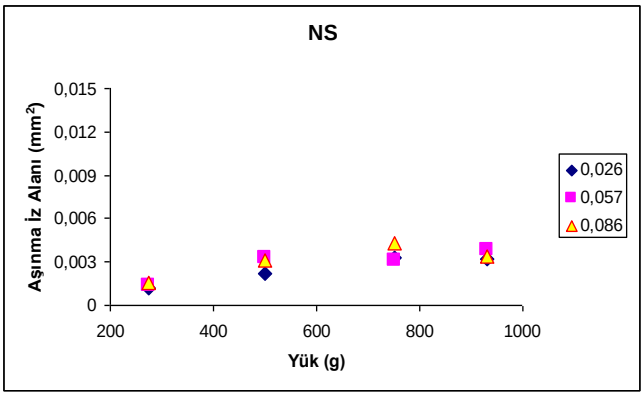
Yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinden aşınma iz alanı ölçülmüştür. EkA'da aşınma izlerinin 3 boyutlu profilleri görülmektedir. Şekil 7.3'de yumuşak çeliğin, Şekil 7.4'de sert çeliğin aşınma alanı-yük eğrileri görülmektedir.



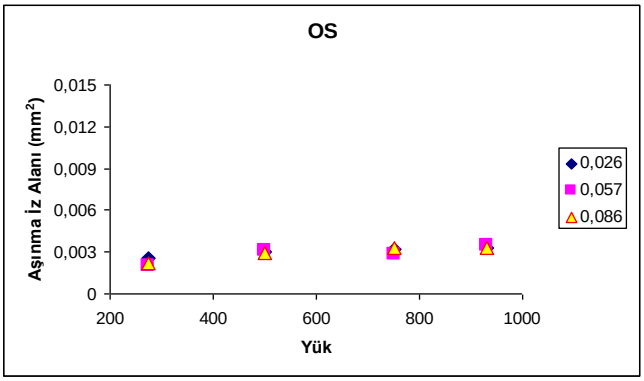
Şekil 7.3. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamalarda oluşan aşınma iz alanlarının normal yükle olan ilişkisi.



(a)



(b)



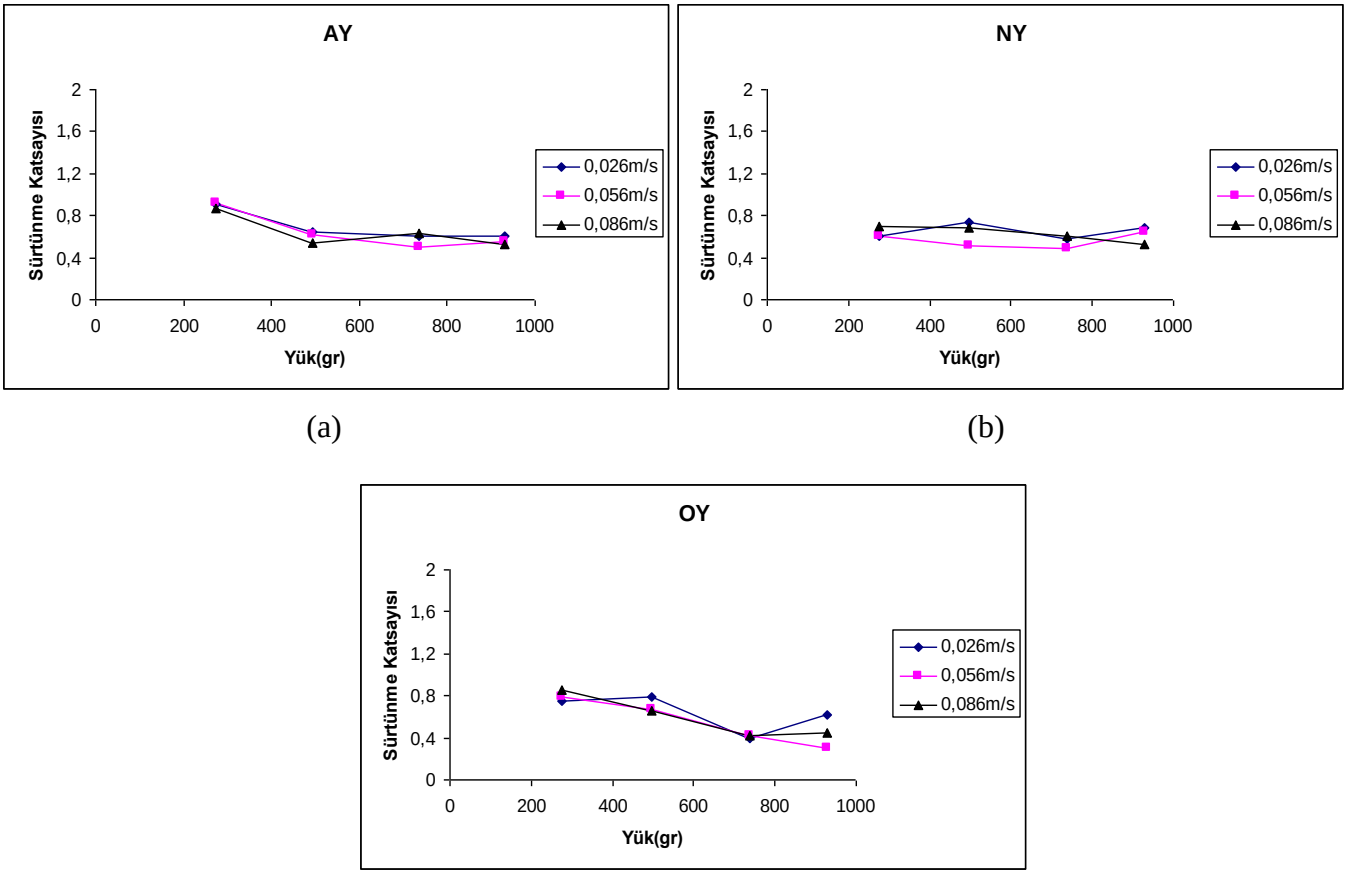
(c)

Şekil 7.4. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamdaki sert çelik kaplamalarda oluşan aşınma iz alanlarının normal yükle olan ilişkisi.

Şekil 7.3 ’ve Şekil 7.4’den görüldüğü gibi yumuşak çelik kaplamada sert çelik kaplamaya göre yük arttıkça aşınma miktarı daha fazla artmaktadır. Ayrıca aşınma hızı arttıkça sert çelik kaplamada aşınma miktarı değişmezken yumuşak çelik kaplamada aşınma artmaktadır.

Oksijen fazlası ortamda yapılan sert ve yumuşak çelik kaplamalar, her yükte diğer kaplama ortanlarına (nötr ve asetilen fazlası) göre daha üstün aşınma direnci göstermiştir. Aşınma izlerine ait SEM görüntüleri Ek B’de verilmiştir.

Sürtünme katsayısının aşınma deneyleri sırasında kararlı hale geldiği değer, deney yüküne ve test edilen malzemeye bağlı olarak Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da görülmektedir.

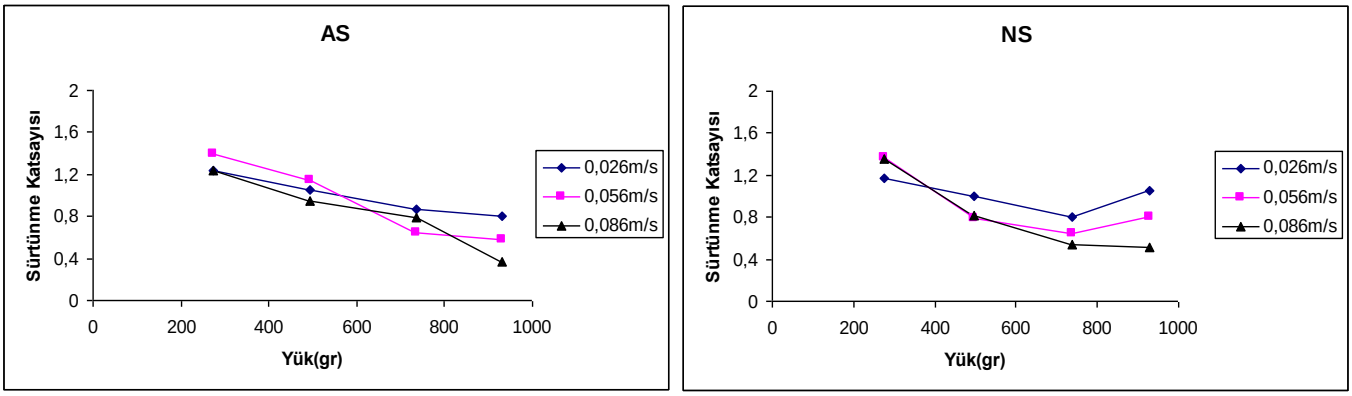


(a) (b)

(c)

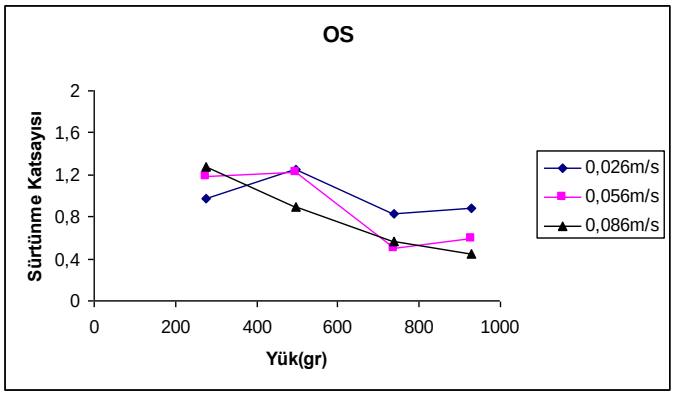
Şekil 7.5. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelik kaplamanın aşınma deneylerinde gösterdikleri sürtünme katsayıları ile normal yükün ilişkisi.

Şekil 7.5'de görüldüğü gibi asetilen fazlası ve oksijen fazlası ortamda kaplanmış yumuşak çelikte yük arttıkça sürtünme katsayısında düşme meydana gelmiştir, nötr ortamda kaplanmış yumuşak çelikte ise yük artışıyla birlikte sürtünme katsayısında önemli bir değişme görülmemiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 7.6. a) Asetilen fazlası, b) nötr c) oksijen fazlası ortamda kaplanmış sert çelik kaplamanın aşınma deneylerinde gösterdikleri sürtünme katsayıları ile normal yükün ilişkisi.

Şekil 7.6.'da görüldüğü gibi; bütün (asetilen fazlası, nötr, oksijen fazlası) ortamlarda sert çelik kaplamalarda yük artışıyla birlikte sürtünme katsayısında düşme meydana gelmektedir.

Ayrıca yumuşak çelik kaplamalar sert çelik kaplamalara göre daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir.

8. GENEL SONUÇLAR

Alev püskürtme yöntemiyle alüminyum üzerine asetilen fazlası, nötr, oksijen fazlası ortamlarda yapılan düşük karbonlu ve yüksek karbonlu çelik kaplamaların mikroyapı ve aşınma davranışlarının incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yüksek karbonlu çelik kaplamalar düşük karbonlu çelik kaplamalara nazaran daha yüksek sertlik ve poroziteye sahiptir.
- Yüksek karbonlu çelik kaplamaların aşınma direnci düşük karbonlu çelik kaplamaların aşınma direncinden daha yüksek olup kayma hızından etkilenmemektedir. Düşük karbonlu çelik kaplamalarda artan kayma hızıyla aşınma miktarı artmaktadır.
- Oksijen fazlası ortamda yapılan kaplama koşulunda gerek yüksek gerekse düşük karbonlu çelik kaplamalarda en yüksek aşınma direnci elde edilmiştir.
- Yumuşak çelik kaplamalar, sert çelik kaplamalara göre daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir.

KAYNAKLAR

[1] **Topbaş, A.,** 1993. Endüstri Malzemeleri,Yıldız, Cilt-1 ,260.

[2] **McCune, R.C.,** 1995. Thermal sraying of cylinder bore surfaces for aluminum engine blocks, Welding Journal, **August,** 41-47.

[3] **Edrisy, A., Perry, T., Cheng, Y.T., A.T.Alpas.,** 2001. The effect of humidity on the sliding wear of plasma transfer wire arc thermal sprayed low carbon steel coatings, Surface and Coating Technology, **v146-147,** 571-577.

[4] **Edrisy, A., Perry, T., Cheng, Y.T., Alpas, A.T.,** 2001. Wear of thermal spray deposited low carbon steel coatings on aluminum alloys, Wear, **v251,** 1023-1033.

[5] **Edrisy, A., Alpas, A.T.,** 2002. Microstructures and sliding wear resistances of 0,2% carbon steel coatings deposited by HVOF and PTWA thermal spray processes,Thin Solid Films **v420-421,** 338-344.

[6] **Knotek, O.,** 2001. "Wear and corrosion resistant hard coatings for non-cutting tool applications", in Handbook of hard coatings, R.F. Bunshah (ed.), Noyes Publications, New York, 77-108.

[7] **Kushner, Burton A., Novinski, Edward R.,** 1990. "Thermal spray coatings" in ASM Handbook **V:18** Friction,lubrication and wear technology, tenth edition Scot D Henry (ed.), ASM Internatıonal The Materials Information Society, 829-833.

[8] **Hutchings, I.M.,** 1992. Tribology:Friction and wear of engineering materials,Edward Arnold, London Melbourne Auckland 228-234.

[9] **Jr Tucker, R.C.,** 1996. "Introduction to thermal spray coatings", in Handbook of thin film process technology,David A. Glocker,S. Ismat Shah (ed.) Institute of Physics Publishing,Bristol and Philadelphia, A4.O:1-A4.5:8.

[10] **Liu, Pi Lin., Shang, Jian Ku., Popoola, Oludele O.,** 2000. Fatigue behavior of a thermally sprayed low carbon steel coating, Materials Science and Engineering, **V:A277,** 176–182.

[11] **Rabiei, A., Mumm, D.R., Hutchinson, J.W., Schweinfest, R., Ruhle, M.,**

Evans, A.G., 1999. Microstructure, deformation and cracking characteristics of thermal spray ferrous coatings,Materials Science and Engineering, **V:A269**,

152–165.

[12] **Jr Tucker, R.C.,** 1997. "The use of thermal spray coatings for protection against wear and corrosion" in Protective coatings and thin films, Yves Pauleau, Péter B. Barna(ed.) Dordrecht:Kluwer Academic Publishers, 387-399.

[13] **Furnival, P.,** 1984. "Metallic coatings for wear resistance" in Coatings and surface treatment for corrosion and wear resistance, K.N. Strafford(ed.) Ellis Horwood Limited Publishers, 15.

[14] **Clare, James H., Crawmer, Darly E.,** 1978. "Thermal spray coatings" in ASM Handbook **V:5,** Surface Cleaning, Finishing and Coating, ninth edition, William G. Wood, (coordinator.); William H. Cubberly, (Direfctor of Publications) American Society for Metals , 532-547.

[15] **McPherson, R.,** 1981. The relationship between the mechanism of formation, Microstructure and properties of plasma sprayed coatings, Thin Solid Films, **V:83,** 297-310.

[16] **Iordanova, I., Forcey, K.S.,** 1997.Texture and residual stresses in thermally sprayed coatings,Surface and Coating Technology, **V:91,**174-182.

[17] **Akman, H.,** Haziran,2001. Endüstride karşılaşılan aşınma promlemlerinin incelenmesi ve tamir- bakım, kaynak yöntemleri uygulanarak kullanım ömürlerinin uzatılması,Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Programı, 88-118.

[18] **Iordanova, I., Forcey, K.S., Gergov, B.,Bojinov, V.,**1995. Characterization of flame-sprayed and plasma-sprayed pure metallic and alloyed coatings, Surface and Coating Technology, **V:72,** 23-29.

[19] **Bushman, M., Gadov, R., Tabellion, J.,** 2000. Experimental and numerical residual stress analysis of layer coated composites, Material Science and Engineering, **V:A 288,** 154-159.

[20] **Vural, M.,** Temmuz,1991. Plazma sprey ile çelikler üzerine kaplanmış oksit seramiklerin termal ve mekanik davranışı,Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Programı, 30-40.

[21] **Murakami, N., Kishitake, K., Hasebe, M.,R., Kobayashi, T.,** 28 May-5 June 1992. Adhesion strength of plasma sprayed Nikel- Aluminum coating on Alumina, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA, 935-940.

[22] **Kamota, S., Sakal, M., Miyakoshi, Y., Tagashira, K.;** 28 May-5 June 1992. Bonding of sintered Alumina and metals with thermal Spray Coatings, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA, 929-934.

[23] **Ambroz, O., Krejcova, J.,** 28 May-5 June 1992. Determination of the adhesive and cohesive fracture modes of the adhesion tensile test, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA,

921-927.

[24] **Pamuk, U.,** Mayıs,1996. Plazma spreylenmiş Cr_3C_2-NiCr ve Al_2O_3-TiO_2 kaplamaların abraziv aşınma davranışlarının incelenmesi,Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Programı, 29-46.

[25] **Kuroda, S., Fukushima, T., and Kitahara, S.,** 28 May-5 June 1992. Significance of the quenching stress in the cohesion and adhesion of thermally sprayed coatings, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA, 903-909.

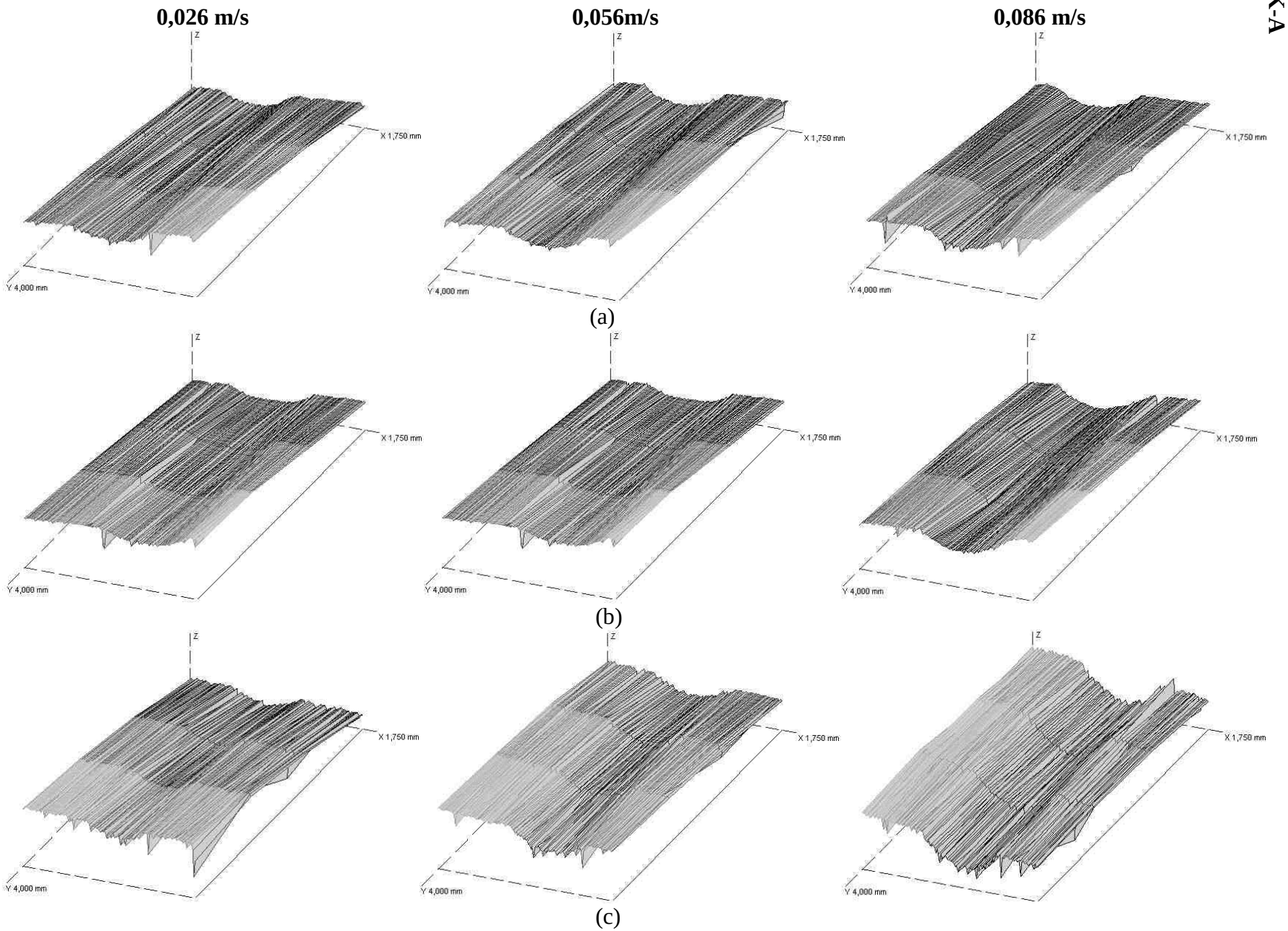
[26] **Amada, S., Yamada, H., Yematsu, S., Saotome, Y.,** 28 May-5 June 1992. Modelling and measurements of adhesive strength of thermal sprayed coatings, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA, 915-919.

[27] **Fukanuma, H.,** 28 May-5 June 1992. An analysis of the porosity producing mechanism, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA, 762-762.

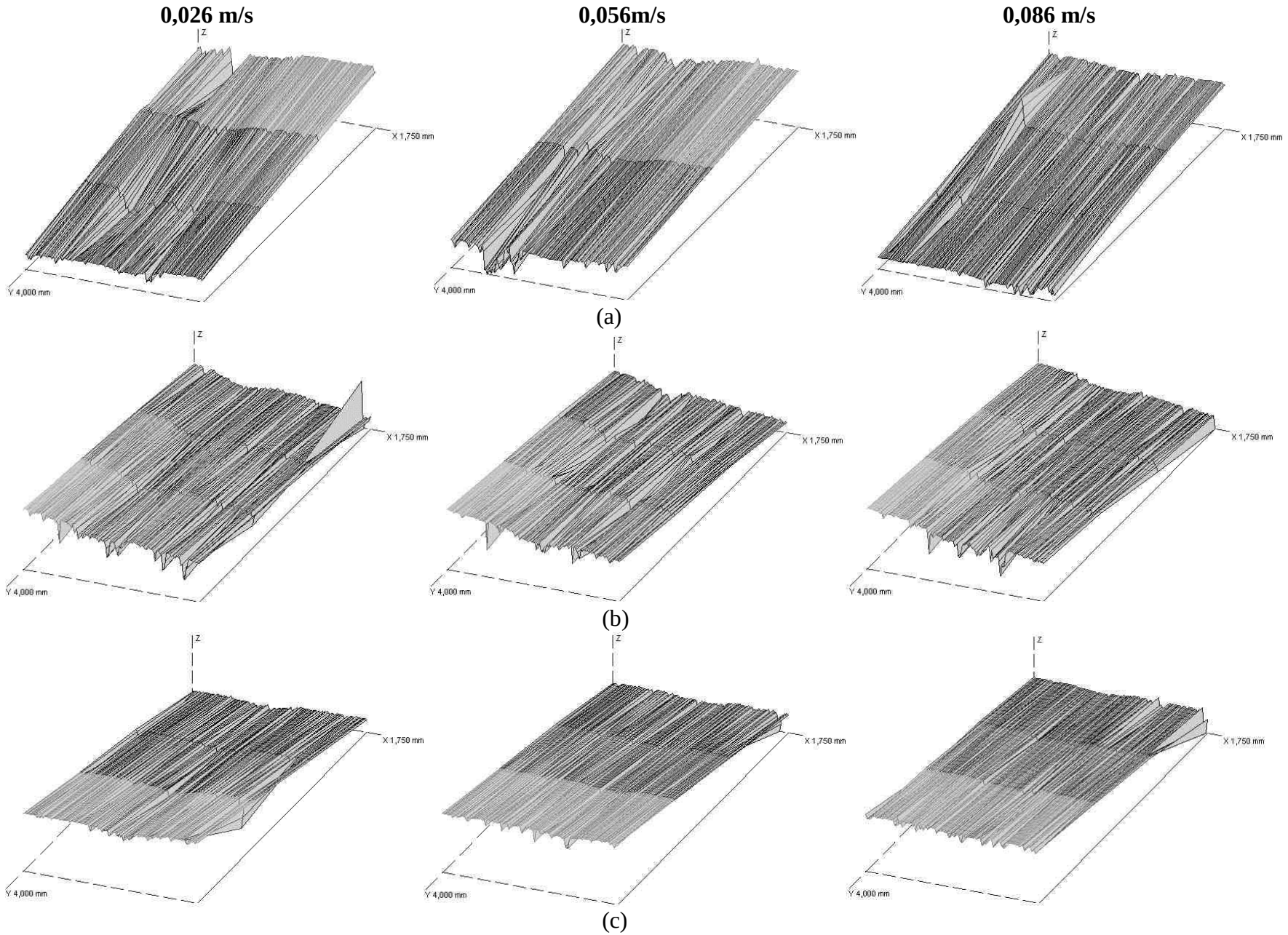
[28] **Smith, R.W., Mutasim, Z.Z., Kangutkar, P.B., Mohanty, M., Krepski,R.P., Drosman R.O.,** 28 May-5 June 1992. A new Iron based thermal spray coating for wear resistance, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA, 653-659.

[29] **Moreau, C., Clelo, P., Lamontagne, M.,** 28 May-5 June 1992.Flattening and solidification of termal sprayed particles, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida, USA, 761-765.

[30] **Kayalı, E.S., Çimenoğlu, H., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y.,**1997,Hasar Analizi Seminer Notları,İstanbul.

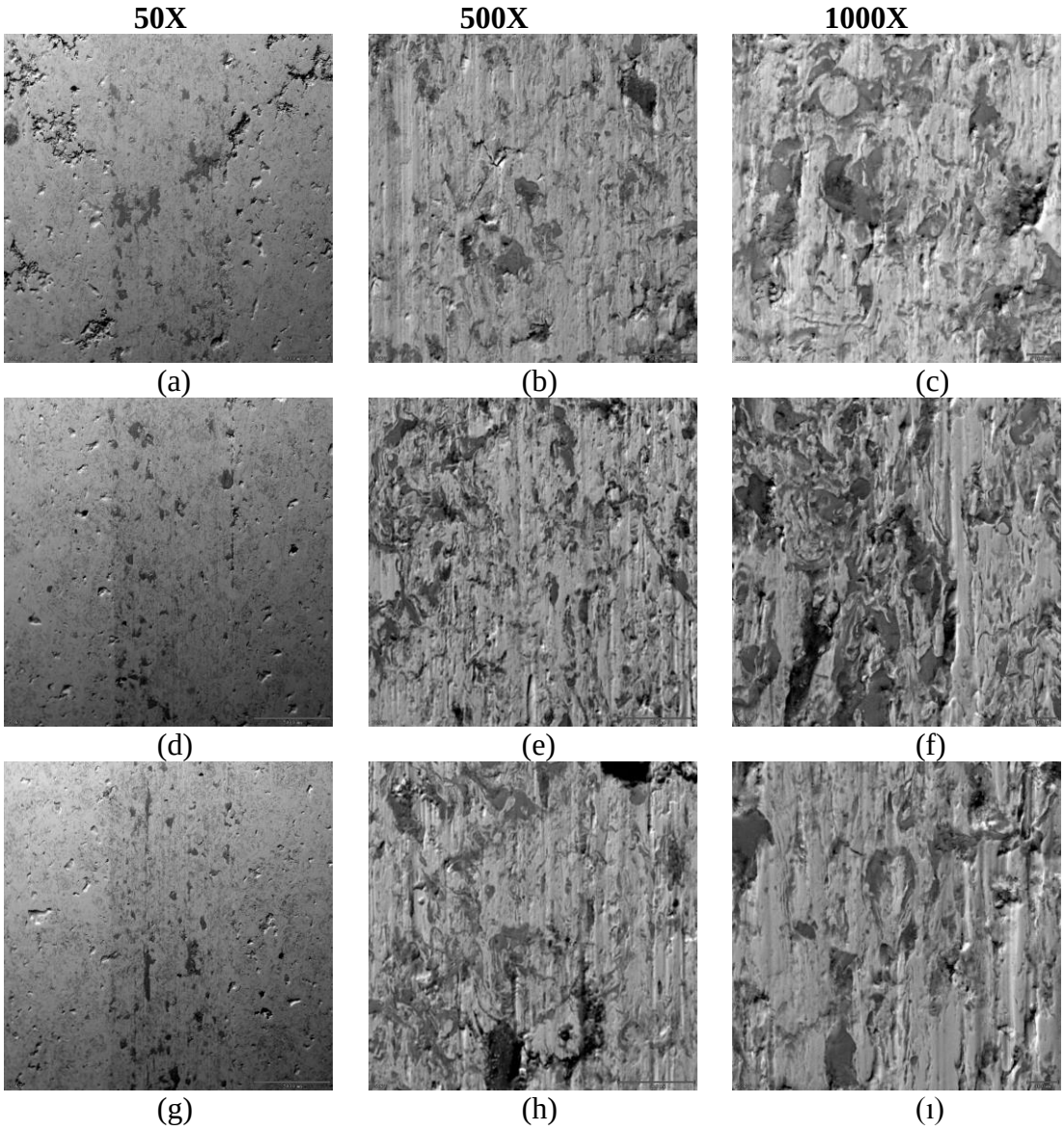


Şekil A.1. Farklı kayma hızlarında a)Asetilen fazlası ortamda b) nötr ortamda c) oksijen fazlası ortamda yumuşak çelik kaplamanın üç boyutlu görüntüleri (Yük=930 g).

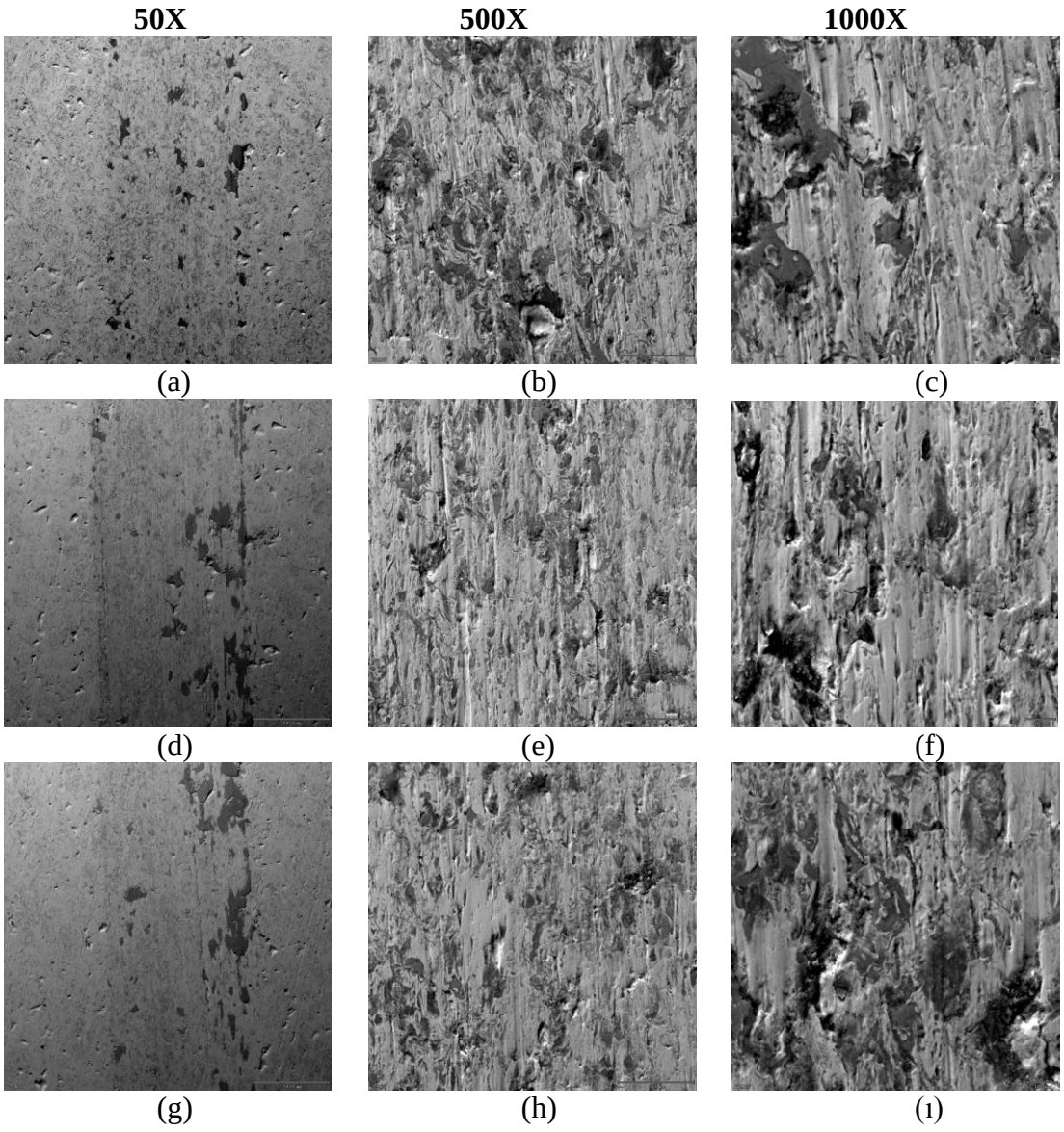


Şekil A2. Farklı kayma hızlarında a)Asetilen fazlası ortamda b) nötr ortamda c) oksijen fazlası ortamda sert çelik kaplamanın üç boyutlu görüntüleri (Yük=930 g).

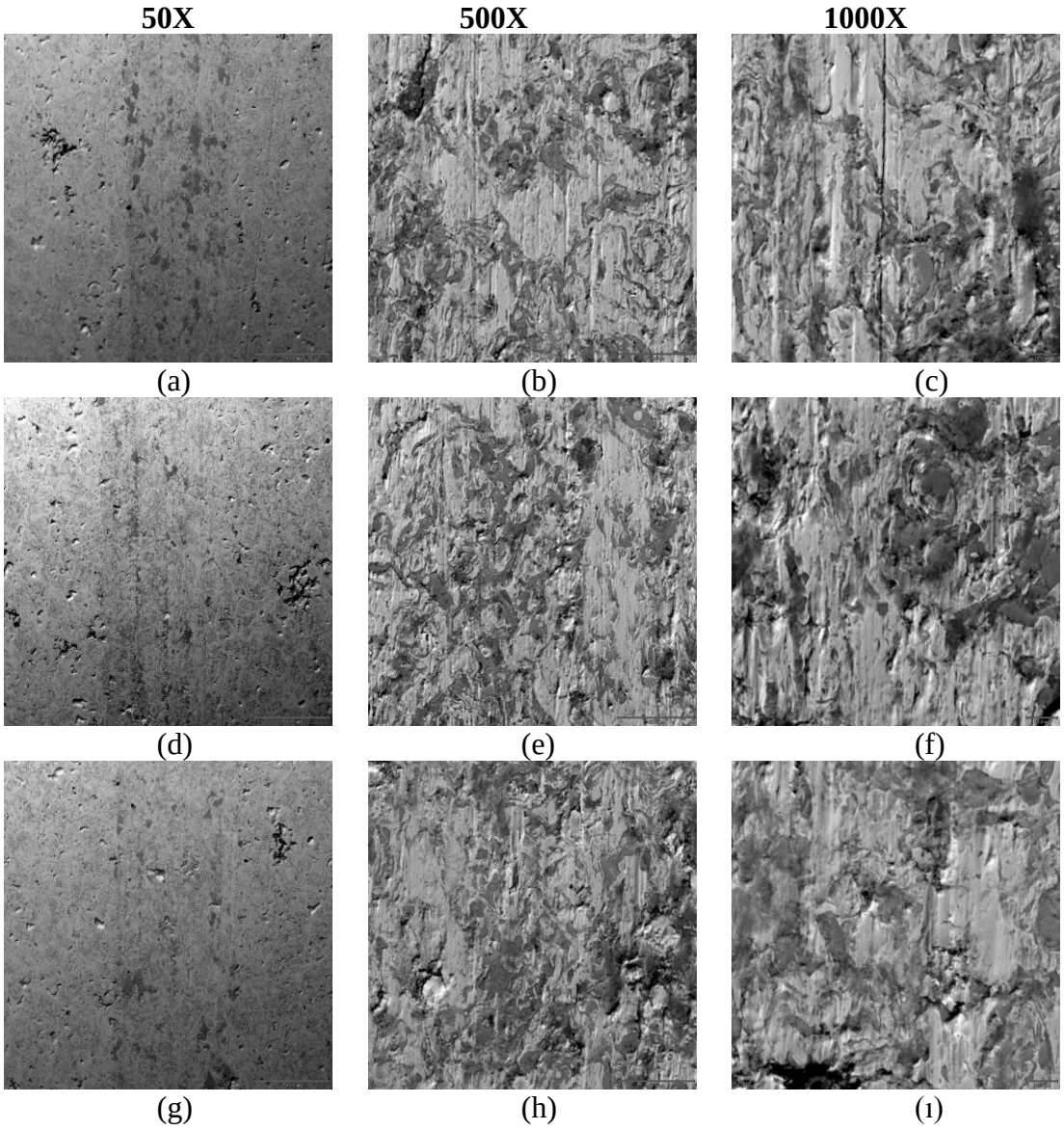
EK-B



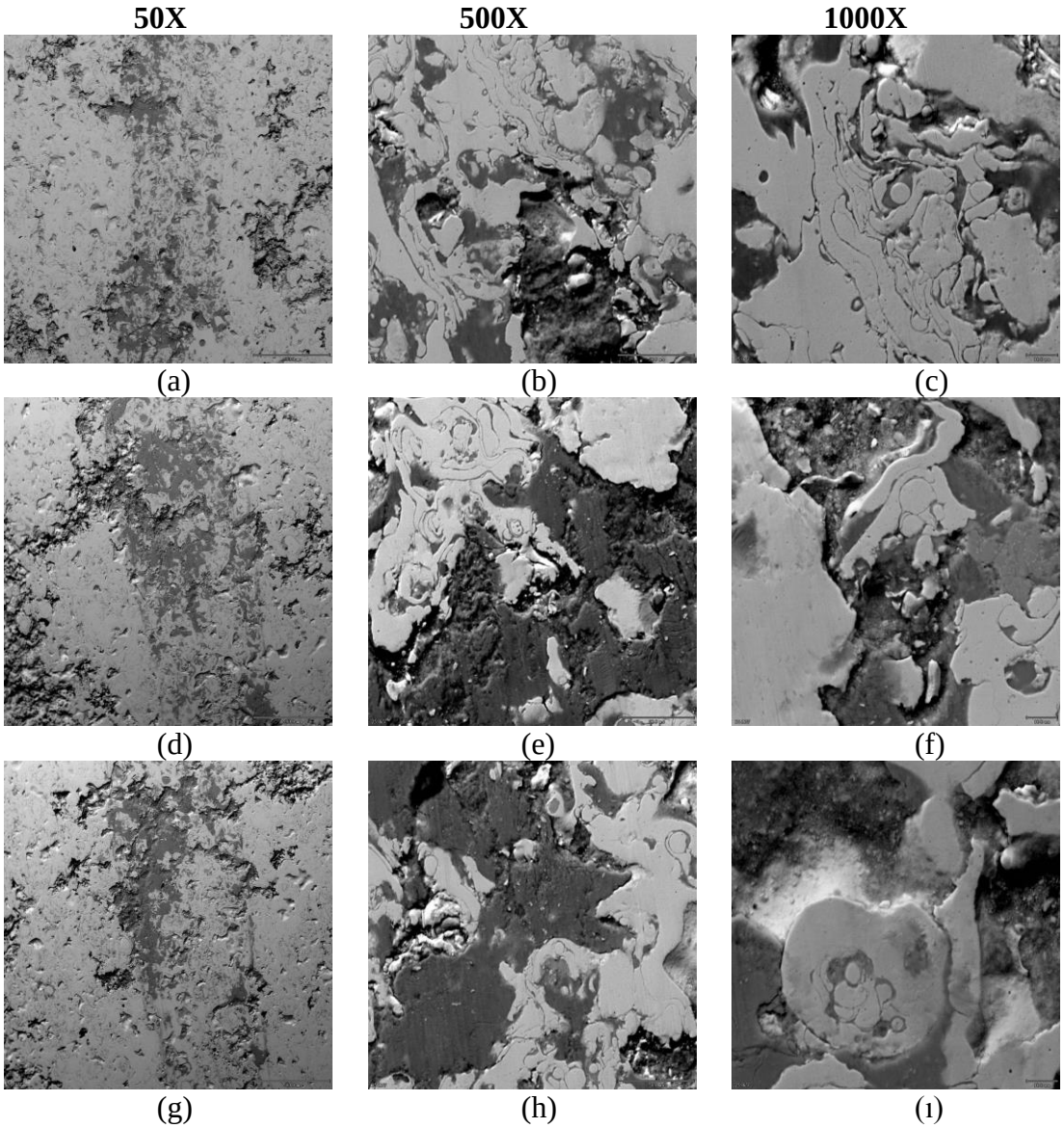
Şekil B.1. Asetilen fazlası ortamda yumuşak çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



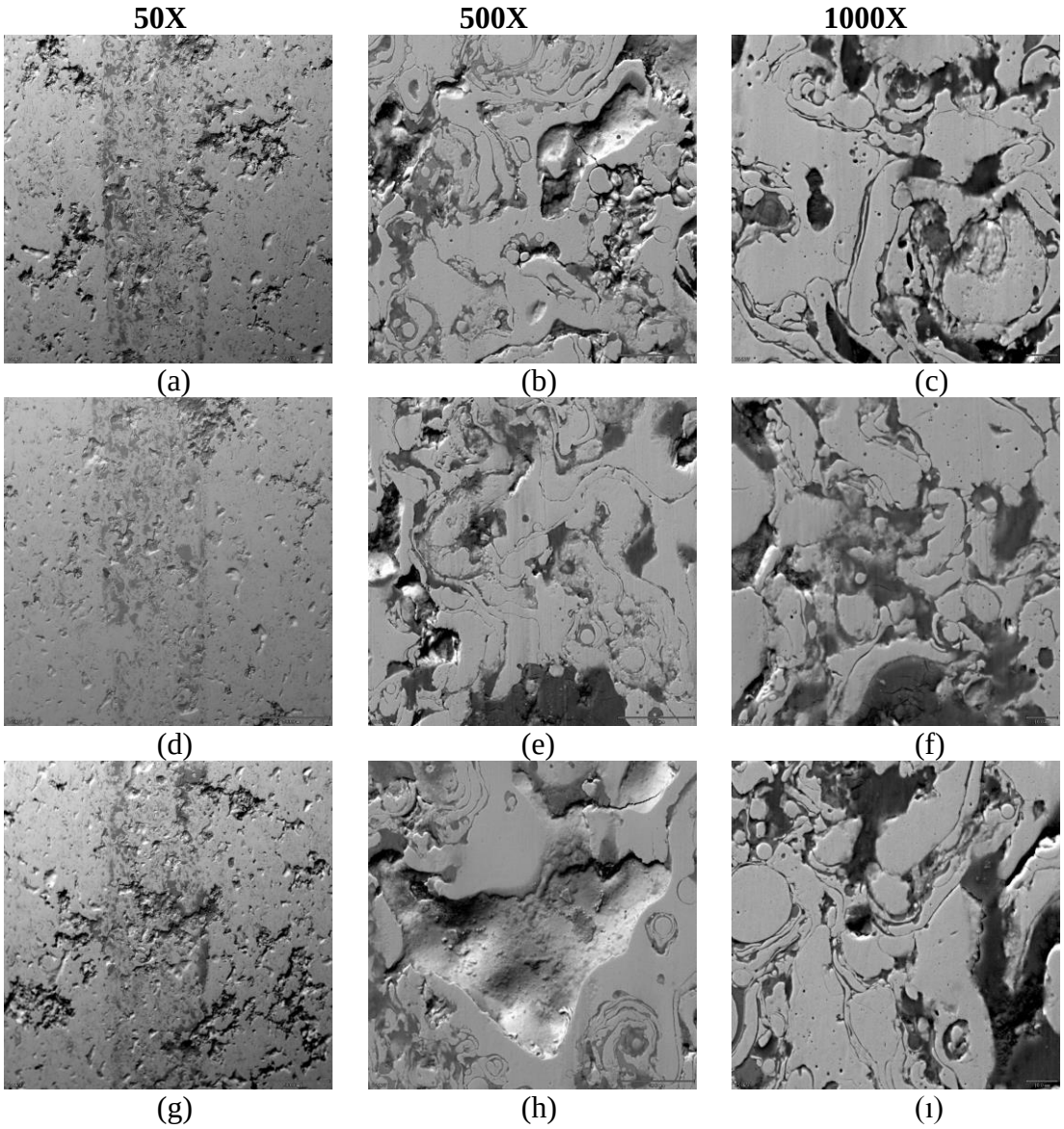
Şekil B.2. Nötr ortamda yumuşak çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



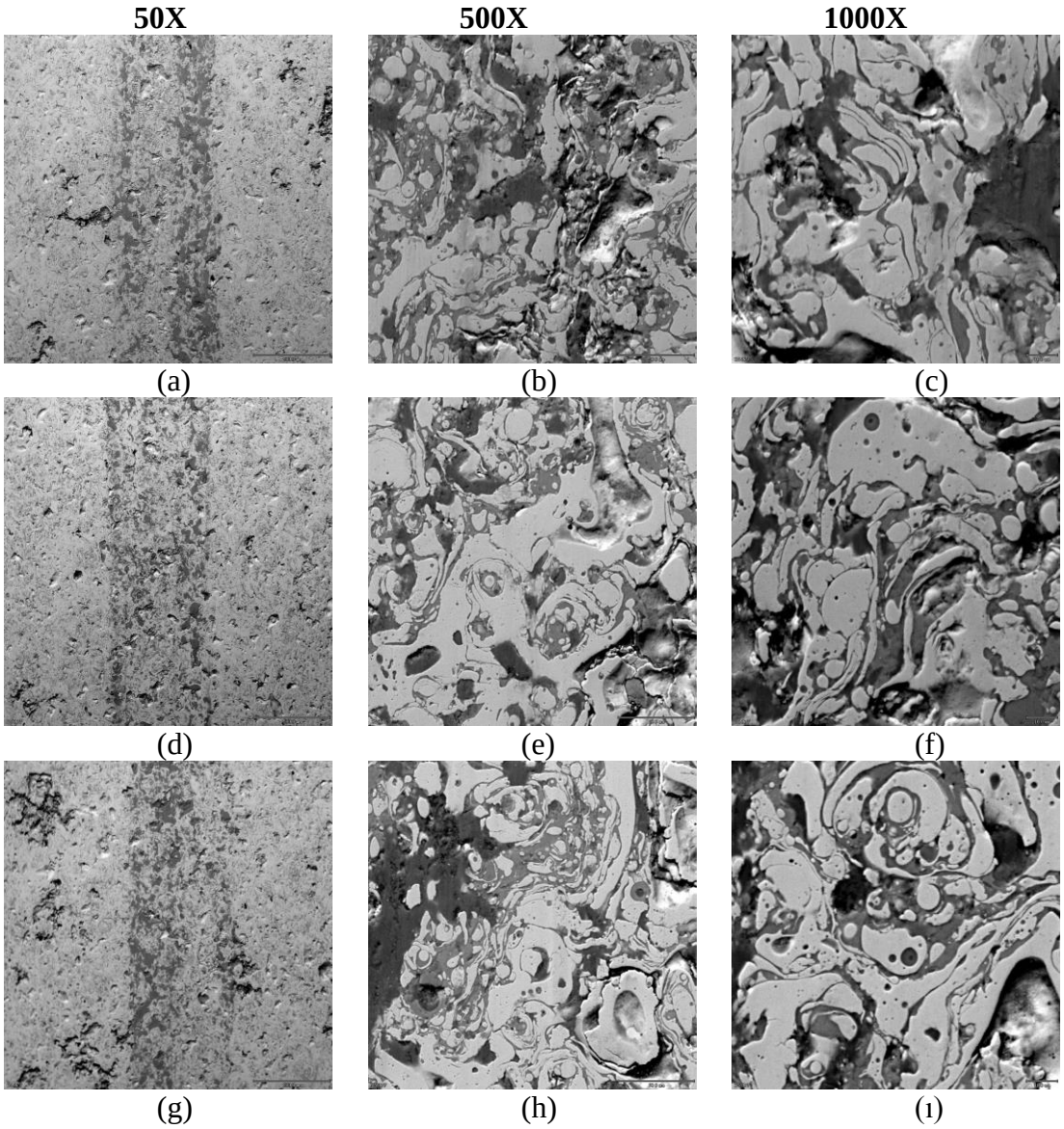
Şekil B.3. Oksijen fazlası ortamda yumuşak çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



Şekil B.4. Asetilen fazlası ortamda sert çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



Şekil B.5. Nötr ortamda sert çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



Şekil B.6. Oksijen fazlası ortamda sert çelik kaplamanın 0,026 m/s (a-c), 0,056 m/s (d-f) ve 0,086 m/s (g-ı) kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).

ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Samsun' da doğmuştur.Lise eğitimini 1993 yılında Samsun 19 Mayıs Lisesi' nde tamamlamıştır.1999 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Mühendisliği Bölümünden Metalurji Mühendisi ünvanı ile mezun olmuştur. Aynı yıl girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Yabancı Diller Bölümünde bir yıl İngilizce Hazırlık Eğitimi Görmüştür.2000 yılında, İ.T.Ü., Fen bilimleri Enstitüsü,Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme Programında Yüsek Lisans Eğitimine Başlamıştır. 2001-2002 yılları arasında Kayseri'de kısa dönem olarak askerlik hizmetini tamamlamıştır. 2002-2003 öğretim yılında Yüksek lisans eğitimine devam etmiştir.