



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE KISMİ STABİLİZE
EDİLMİŞ ZİRKONYA KAPLANMIŞ HAFİF METAL
ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Metalurji ve Malzeme Yük. Müh. Eray ERZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

Prof. Dr. Suat YILMAZ

Şubat, 2011

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE KISMİ STABİLİZE
EDİLMİŞ ZİRKONYA KAPLANMIŞ HAFİF METAL
ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Metalurji ve Malzeme Yük. Müh. Eray ERZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

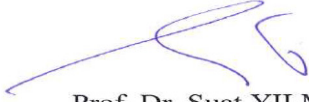
Prof. Dr. Suat YILMAZ

Şubat, 2011

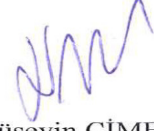
İSTANBUL

Bu çalışma 02 / 02 / 2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Prof. Dr. Suat YILMAZ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi
Kimya – Metalurji Fakültesi



Prof. Dr. Şerafettin EROĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. İbrahim YUSUFÖĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Ercan AÇMA
İstanbul Teknik Üniversitesi
Kimya – Metalurji Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliđinin 515-05052006 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof.Dr.Suat YILMAZ'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma ve iyi ve kötü günümde hep yanımda olan Yard. Doç. Dr. Cem KAHRUMAN'a çok teşekkür ederim.

Çalışmamı destekleyen İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Her türlü fedâkarlıkla bulunarak bugünlere gelmemi sağlayan canım aileme minnetlerimi sunarım

Şubat, 2011

Eray ERZİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1 6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ	4
2.2 YÜZEY İŞLEM TEKNİKLERİ	6
2.2.1 Yüzey İşlem Teknikleri Hakkında Genel Bilgiler	6
2.2.2. Yüzey Kaplamaları	6
2.3. METAL YÜZEYLERİNİN SERAMİKLE KAPLANMASI	6
2.3.1 Seramik Kaplama Malzemeleri	6
2.3.2. Zirkonya.....	8
2.3.3. Seramik Kaplama Teknikleri	14
2.4. ISIL PÜSKÜRTME TEKNİKLERİ	17
2.4.1. Isıl Püskürtme	17
2.4.2. Isıl Püskürtme Teknikleriyle Yapılan Seramik Kaplamaların Özellikleri.....	17
2.4.3. Isıl Püskürtme İle Kaplanacak Yüzeylerin Hazırlanması.....	18
2.4.4. Isıl Püskürtme İle Yapılan Seramik Kaplamaların Teşekkülü	18
2.5 PLAZMA PÜSKÜRTME KAPLAMA PROSESİ	21
2.5.1. Plazma	21

2.5.2. Plazma Püskürtme İle Kaplama Prosesinde Ön İşlemler	22
2.5.3. Plazma Püskürtme Kaplama	24
2.5.4. Plazma Püskürtme İle Kaplama Prosesinde Kullanılan Cihazlar	26
2.5.5. Plazma Püskürtmede Kullanılan Gazlar	27
2.5.6. Astarlanma	29
2.5.7. Plazma Püskürtmede Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar.....	29
2.5.8. Plazma Püskürtme Yönteminin Avantajları Ve Kullanım Yerleri ...	30
2.5.9. Toza Bağlı Olarak Değişen Uygulama Alanları	31
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	32
3.1 NUMUNE HAZIRLAMA	32
3.2 PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE NUMUNE YÜZEYLERİNİN Y-PSZ İLE KAPLANMASI.....	35
3.4 MİKRO SERTLİK DENEYLERİ.....	37
3.5 DARBE MUKAVEMETİ DENEYLERİ.....	38
3.6 ABRASİF AŞINMA DENEYLERİ	40
3.7 SÜRÜNME DENEYLERİ.....	43
4. BULGULAR.....	50
4.2 SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI	53
4.3 DARBE DENEYİ SONUÇLARI	53
4.4 AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI	53
4.5 SÜRÜNME DENEYİ SONUÇLARI	61
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	71
KAYNAKLAR.....	76
EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	86

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Al-Mg ₂ Si faz diyagramı.....	5
Şekil 2.2	: Zirkonyanın kristal yapıları; a) Kübik (k-ZrO ₂), b) Tetragonal (t-ZrO ₂), c) Monoklinik (m-ZrO ₂)	10
Şekil 2.3	: ZrO ₂ – Y ₂ O ₃ ikli faz denge diyagramı.....	11
Şekil 2.4	:Çatlak ucu deformasyon alanında tetragonal→monoklin zirkonya faz dönüşümünün (transformation toughness) şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.5	: Isıl püskürtme prosesi.....	18
Şekil 2.6	:Yaklaşık plazma sıcaklıkları 1- 7800°C, 2- 10000-13400°C, 3- 7800-10000°C.....	25
Şekil 2.7	:Plazma püskürtme prosesinde yer alan cihazlar.....	27
Şekil 2.8	:Çeşitli gazların sıcaklıkla bağlantılı enerji içerikleri.....	29
Şekil 3.1	:6063 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma ısıl işlem rejimi (T6 ısıl işlemi)	33
Şekil 3.2	:Mekanik testler için hazırlanmış test numuneleri.....	33
Şekil 3.3	:Kaplama malzemesi olarak kullanılan Y-PSZ seramik tozun XRD diyagramı.	34
Şekil 3.4	:Kaplama malzemesi olarak kullanılan Y-PSZ seramik tozun SEM ve EDS diyagramı.	35
Şekil 3.5	:Plazma püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.6	:Plazma püskürtme yönteminde kullanılan tabanca (3MB Sulzer Metco Plasma Flame Spray Gun).....	36
Şekil 3.7	:Plazma püskürtme ile Y-PSZ kaplanmış ve kaplanmamış deney numune örnekleri.....	37
Şekil 3.8	:Vickers ucunun numune üzerine bıraktığı iz ve köşegenlerin gösterimi	38
Şekil 3.9	:Charpy darbe deneyi cihazının çalışma prensibi.....	40
Şekil 3.10a	:Darbe deneyi cihazı.....	40
Şekil 3.10b	:Darbe deneyi numuneleri.	40
Şekil 3.11	:“Pin on Disc” tipi aşınma testinin şematik görünüşü.....	41
Şekil 3.12a	:Aşınma testi cihazı	42
Şekil 3.12b	:Pin ve numune yerleştirme kafası..	42
Şekil 3.13	:Kaplanmamış ve Y-PSZ kaplanmış 6063 abrasif aşınma testi numuneleri	43
Şekil 3.14	:Sürünme test cihazının çalışma prensibinin şematik görünümü	43
Şekil 3.15	:Tipik Sürünme Eğrisi	44
Şekil 3.16a	:Sabit sıcaklık ve farklı gerilmelere bağlı elde edilmiş sürünme eğrilerinin şematik gösterimi	45
Şekil 3.16b	:Sabit gerilme ve farklı sıcaklıklara bağlı elde edilmiş sürünme eğrilerinin şematik gösterimi	45
Şekil 3.17	:Gerilmeye bağlı faktörün (n) belirlenmesinin şematik gösterimi.	46

Şekil 3.18	:Sıcaklığa bağlı aktivasyon enerjisinin (Q) belirlenmesinin şematik gösterimi.	46
Şekil 3.19	:Sürünme cihazının genel görünümü.....	47
Şekil 3.20	:Sürünme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmış kaplanmamış ve Y-PSZ ile kaplanmış 6063 alüminyum numuneler	48
Şekil 3.21	:Numunenin ekstansometreye ve termal element çiftinin numuneye bağlanması.....	48
Şekil 4.1	:Kaplama katmanların; astarın ve kaplamanın kalınlıkları.....	50
Şekil 4.2	:Kaplama (Y-PSZ), ara katman (astar, Ni-Al) ile 6063 altlıktan oluşan kompozit yapı.....	51
Şekil 4.3	:Altlık, astar malzemesi ve kaplamanın birbirinden ayrımının belirlenmesi için uygulanan SEM-EDS Mapping çalışması.....	53
Şekil 4.4	:Kapanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma mesafelerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri	55
Şekil 4.5	:Kapanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma yüklerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri	56
Şekil 4.6	:Kapanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma hızlarında aşınma ağırlık kaybı değişimleri	56
Şekil 4.7	:Y-PSZ Kapanmış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma mesafelerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri	57
Şekil 4.8	:Y-PSZ Kapanmış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma yüklerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri	57
Şekil 4.9	:Y-PSZ Kapanmış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma hızlarında aşınma ağırlık kaybı değişimleri	58
Şekil 4.10	:Y-PSZ Kapanmış ve kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma mesafelerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri	58
Şekil 4.11	:Y-PSZ Kapanmış ve kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma yüklerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri	59
Şekil 4.12	:Y-PSZ Kapanmış ve kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma hızlarında aşınma ağırlık kaybı değişimleri	59
Şekil 4.13	:Aşınma deneyine tabi olunan kaplanmamış numunelerden alınan örneklere uygulan SEM analizi sonuçları.....	61
Şekil 4.14	:Aşınma deneyine tabi olunan Y-PSZ kaplanmış numunelerden alınan örneklere uygulan SEM analizi sonuçları.....	61
Şekil 4.15	:a ve b)170 MPa sabit yük altında üç farklı sıcaklıkta ($\sigma_1 - T_1$, $\sigma_1 - T_2$, $\sigma_1 - T_3$) numunelerinin sürünme davranışları (A: kaplanmamış , B: kaplanmış numuneler)	63
Şekil 4.16	:c ve d) 150 °C sabit sıcaklık altında üç farklı gerilme ($\sigma_1 - T_1$, $\sigma_2 - T_1$, $\sigma_3 - T_1$) numunelerinin sürünme davranışları (C: Kapanmış, D: Kapanmamış numuneler)	64
Şekil 4.17	:170 MPa gerilim ve 100 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması	65
Şekil 4.18	:170 MPa gerilim ve 125 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması	65
Şekil 4.19	:170 MPa gerilim ve 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması	66
Şekil 4.20	:145 MPa gerilim ve 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması	66

Şekil 4.21	:120 MPa gerilim ve 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması	67
Şekil 4.22	:Y-PSZ kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin sürünme sonuçlarına göre $\ln\dot{\epsilon}$ - $\ln\sigma_{uyg}$ arasında grafik. a) Y-PSZ kaplanmış b) kaplanmamış 6063 alaşımı	68
Şekil 4.23	:Y-PSZ kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin sürünme sonuçlarına göre $\ln\dot{\epsilon}$ - $1/T$ arasında grafik. a) Y-PSZ kaplanmış b) kaplanmamış 6063 alaşımı	69

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	:6063 alaşımının kimyasal bileşimi.....	4
Tablo 3.1	:6063 (Etial 60) alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri (ağ.%) .	32
Tablo 4.1	:Kaplanmamış ve Y-PSZ kaplanmış numunelerin abrasif aşınmada ağırlık kayıpları	55
Tablo 4.2	:Tüm deney şartlarında ölçülmüş ortalama kinetik sürtünme katsayıları	60
Tablo 4.3	:Deneylerde uygulanan gerilme ve sıcaklık setleri	62

SEMBOL LİSTESİ

a	: Tepe açısı
A₀	: Malzeme sabiti,
b	:Yükseliş açısı (derece)
d	:İz köşegenlerinin ortalaması
é	:Sürünme hızı
F	:Uygulanan deney yükü
ΔG	:Ağırlık kaybı
G	:Sarkacın ağırlığı
h	:Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği
h₁	:Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği
L	:Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine olan uzaklığı
n	: Gerilme faktörü
Q	: Aktivasyon enerjisi
R	: Gaz sabiti
ρ	:Yoğunluk
σ_{uyg}	: Uygulanan gerilme
T_{uyg}	: Uygulanan Sıcaklık
ΔV	:Hacimsel kayıp

ÖZET

ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE KISMİ STABİLİZE EDİLMİŞ ZİRKONYA KAPLANMIŞ HAFİF METAL ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Alüminyum alaşımları gibi hafif metaller, ekonomik ve ekolojik nedenlerden dolayı endüstride yoğun biçimde kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemelerin sertlikleri, mekanik mukavemetleri ve aşınma dirençlerinin düşük olması bir dezavantaj olarak görülmektedir. Sağladıkları ağırlık tasarrufu nedeniyle kullanılma gerekliliği her gün biraz daha artan alüminyum alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için çeşitli endüstriyel yöntemler uygulanmaktadır. Örneğin, aşınmaya karşı alınabilecek en basit önlem, tüm elemanların aşınmaya karşı dayanıklı malzemeden imal edilmesidir ancak bu yaklaşım çoğu zaman yüksek maliyeti de beraberinde getirir. Aşınma bir yüzey hadisesi olduğundan uygun bir kaplama seçimi ile malzemenin ömrü azami seviyeye çıkarılabileceği gibi maliyeti de asgariye düşürebilir. Bir malzeme kendisinden daha sert bir kaplamaya sahip olduğunda, kaplama var oldukça ana malzemedeki aşınma azalmış olacaktır, zira aynı şartlar altında sert malzemeler, yumuşak malzemelerden genellikle daha az aşınırlar ve ayrıca içi yumuşak dışı sert malzemelerin toklukları daima yüksektir.

Isıl püskürtme yöntemleri, özellikle plazma püskürtme yöntemi son yıllarda önemli uygulama alanları bularak yaygınlaşmaktadır. Yöntem toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesinin ergiyik ya da kısmi-ergiyik durumuna getirilerek, kaplanacak yüzeye hızlı bir şekilde (~80m/s) püskürtülmesine dayanmaktadır. Bu yöntem ile üretilen Al_2O_3 ve ZrO_2 gibi sert seramik kaplanmış metalik malzemelerin, mekanik mukavemeti ve aşınma direncinin geliştirilmesiyle, değişik endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı yaratılmıştır.

Bu çalışmada; 6063 alüminyum alaşımının yüzeyi ağırlık %8 Y_2O_3 ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya (Y-PSZ) ile plazma püskürtme yöntemi ile kaplanmış, böylece çeşitli

mekanik özellikleriyle birlikte, aşınma dayanımı ve sürünme dayanımı özellikleri incelenmiştir.

Bu amaca yönelik olarak enjeksiyon pres döküm yoluyla şekillendirilmiş 6063 serisi alüminyum çubukların talaşla kaldırma kabiliyetini arttırmak için önce T6 ısıt işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra standartlarına uygun olarak darbe, aşınma, sürünme vb. test numuneleri şekillendirilmiştir. Şekillendirilen test numunelerinin yarısının yüzeyleri plazma püskürtme yöntemi uygulanarak önce astar ve sonra Y-PSZ ile kaplamaları gerçekleştirilmiştir. Y-PSZ ile kaplanmış yüzeylerin XRD, SEM/EDS ve mikrosertlik gibi karakterizasyon çalışmalarının ardından, kaplanmış ve kaplanmamış test numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarına geçilmiştir. Bunun için sertlik testleri; çentikli charpy darbe deneyleri; farklı yükler, süre ve hız şartları altında abrasif aşınma deneyleri ve Üssel Sürünme Kanunu'na uygun olarak gerilmeye/sıcaklığa bağlı sürünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmaların sonucunda Y-PSZ ile kaplanmış 6063 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerinin yüksek oranda geliştirilebildiği belirlenmiştir. Y-PSZ kaplama ile kaplanmamışına göre abrasif aşınma direnci yüksek oranda arttırılırken, sürünme katsayısında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Sürünme deneyleri sonucunda kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin sürünme hızları belirlendikten sonra, gerilme faktörü (n) ve sürünmede aktivasyon enerji (Q) değerleri hesaplanarak belirlenmiştir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF THERMALLY SPRAYED PARTIALLY-STABILIZED ZIRCONIA COATED LIGHT METAL ALLOYS

Light metals like aluminum alloys have been used in industries for years because of both economical and ecological reasons. But these materials have some disadvantages like low hardness, mechanical strength and wear resistance. Because of their low weights their need for usage in industries are increasing with the need of improving their mechanical and tribological properties. For example; easiest way to resist against wear is to produce the machine parts with hard materials but this solution increase the productions cost of these parts. Wear is a surface problem so we can increase the lifespan of that part, production costs will still stay low. When a material has a coating which is harder than itself, it's wear resistance will be high as long as that coating exists. Because it's known that harder materials have better wear resistance than softer materials also soft materials with hard coatings is known as their high toughness properties.

Thermal spray methods and especially plasma spray method have increasing importance and being widely used by industries. This method depends on the purpose of spraying the melted wire or powder based coating materials to a surface by the speeds of ~80m/s. By using this method and using ceramic powders like Al_2O_3 and ZrO_2 new application areas were created with improving mechanical properties and wear resistances of metals.

In this study, 6063 aluminum alloys surface were coated with wt% 8Y₂O₃-Partially Stabilized Zirconia (Y-PSZ) by plasma spray process and their mechanical, wear and creep behaviors were investigated.

For this purpose T6 heat treatment was applied to injection press casted 6063 series of aluminum bars to increase its machining ability. Then impact, wear, creep etc. test samples were prepared according to the standards. Later, half of the samples were coated with lining and surface coating materials with plasma spray on 6063 aluminum. After the characterization studies like XRD, SEM/EDS and micro hardness tests determination studies of mechanical properties of both coated and un-coated test samples was carried out. To do this hardness tests, charpy impact tests and wear tests for different load, time and speed conditions and also stress and temperature dependant creep tests were carried out according to the Power Law Creep. As a result of these studies Y-PSZ coated 6063 aluminum alloys mechanical properties were significantly increased. By Y-PSZ coating abrasive wear resistance increased no difference on the friction coefficient was observed. As a result of creep tests in coated and uncoated samples after determination of rates of creep, stress factor (n) and creep activation energy (Q) values were calculated.

1.GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları gibi hafif metaller sağladıkları ağırlık ve enerji tasarrufu nedeniyle günümüzde yoğun olarak kullanılmakta, yaygınlaşmakta ve performansları üzerine beklentilerin giderek artmasına neden olmaktadır. Çoğunlukla mekanik ve tribolojik özellikleri rölatif olarak düşük kaldığından yüksek olmayan aşınma direnci göstermektedirler [1]. Örneğin alüminyum ve alaşımlarının; düşük sertliğe, mekanik mukavemete, aşınma direncine ve ergime noktasına sahip olması, kullanım alanlarını da kısıtlamaktadır. Özellikle hareketli makine parçaların da alüminyum alaşımlarının tercih edilmesi, bunların daha yüksek mekanik mukavemete sahip olmaları, daha yüksek sıcaklıklara dayanmaları ve korozyona dirençli olmalarını sağlayabilmek için birçok araştırma geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalara sert seramik kaplanmış alüminyum alaşımları örnek gösterilebilir [2,3]. Yüzeyi sert içi yumuşak malzeme mukavemetli ve tok olacağı için seramik kaplamalar tercih sebebidir. Bir malzeme kendisinden daha sert bir kaplamaya sahip olduğunda, kaplama var oldukça ana malzemedeki aşınma azalmış olacaktır çünkü aynı şartlar altında sert malzeme yumuşak malzemelerden genellikle daha az aşınır. Böylece dizayn esnekliği olan parçalar daha ucuz olarak üretilebilmektedir [4-7]. Seramik malzemeler, başta sahip oldukları üstün ısı, mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle son 30 yılda birçok benzer uygulamada tercih edilse de yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle teknolojik yetersizlikler yüzünden günümüze kadar pek yaygınlaşamamıştır.

B, V, Ti, Zr, Hf, Nb, ve Ta'nın karbür, nitrür ve karbonitrür sert kaplamalar ile çeşitli oksit esaslı sert seramik kaplamalar, metallerin; aşınma, sürtünme ve korozyonun azaltılması, elektriksel iletkenlik, yarı iletkenlik ya da yalıtkanlık sağlama amacıyla veya ısı bariyer amaçlı olmak üzere uygulanabilmektedir. Günümüzde bu amaçla yapılan kaplamalar için CVD, PVD, alevle püskürtme, plazma püskürtme, patlamalı tabanca, sol-gel, sıçratma ve HIP gibi yöntemler kullanılmaktadır [8].

Yaygın seramik kaplama işlemlerinden biri, toz halindeki seramiğin ısıtılıp, ergitilmesinden sonra hızla örneğin bir metal yüzeyine püskürtme usulüyle yüzeye

yapıştırılmasıdır. Isıl püskürtme olarak adlandırılan bu yöntemle genel olarak ergiyebilen herhangi bir malzeme püskürtülebilir. Ancak borürler, karbürler ve nitrürler zor eridiklerinden bunların ısıp püskürtmede kullanılması pek mümkün olmamaktadır [9].

Isıl püskürtme yöntemleri ile üretilen alümina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2) ve kromya (Cr_2O_3) gibi oksit seramik kaplamalar, yüksek aşınma ve sıcaklığa karşı direnç gerektiren birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [10-13].

Zirkonya (ZrO_2) üstün özellikleri olan bir seramik malzemedir. Düşük ısıp iletkenliği, iyi korozyon direnci ve dönüşüm toklaştırmacı (transformation toughness) etkisi nedeniyle yüksek kırılma tokluğu sayesinde özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalınan ortamlarda koruyucu olarak (termal bariyer) ve aşınmaya dirençli malzeme olarak kullanılmaktadır [14-17]. Bir diğler önemli kullanım alanı da lamba probu olarak bilinen katı iyonik iletken malzemelerdir. Bu aygıt, içten yanmalı bir motorun egzoz gazındaki oksijen miktarını ölçer ve ideal yakıt-hava karışımını sağlamak üzere karbüratöre verilen yakıt miktarını ayarlar. Böylece yakıt tasarrufunun sağlanmasının yanında çevre kirliliğii de azaltılmış olur [8].

Zirkonya seramik tozları, ısıp püskürtme yöntemleri kullanılarak metal yüzeyine başarıyla kaplanabilmektedir. Bu kaplamaların yoğunlukları, içerdikleri gözeneklerinden dolayı düşük olur. Püskürtme teknikleri ile üretilen zirkonya kaplamalar 1975 yılından itibaren gittikçe önem kazanmışlardır. Zirkonyanın ergime noktası çok yüksek (2710^0C) ve henüz plazma yöntemi iyi gelişmemiş olduğundan bu tarihten önce malzemenin kaplanması pek mümkün olamamıştır [17].

Zirkonya monoklinik, tetragonal ve kübik olmak üzere üç farklı kristal yapıya sahip allotropik (polimorf) bir malzemedir. Zirkonya 1170^0C 'nin altında monoklinik yapıda bulunur. Bu sıcaklığın üzerinde tetragonal yapıya dönüşür. Tetragonal yapı da 2370^0C ' ye kadar kararlıdır. Bu sıcaklığın üzerinde ise kübik yapı meydana gelir. Monoklinik yapıdan tetragonal yapıya geçiş esnasında hacimsel büyüme %8 oranındadır. Bunun sonucunda malzeme parçalanır. Bu durum zirkonyalı seramiklerin kullanımında büyük problemler ortaya çıkarır. Bunun önüne geçebilmek için stabilizan olarak zirkonyaya CaO , MgO , CeO_2 , Y_2O_3 gibi toprak alkali ve nadir elementlerin

oksitleri katılmaktadır. Böylece zirkonyanın üst modifikasyonları olan tetragonal ve kübik yapıların oda sıcaklığında kısmen kararlı hale gelmiş olması sağlanır. Tam stabilize edilmiş zirkonyanın mekanik özellikleri zayıftır. Bu nedenle tamamen kararlı kübik yapı yerine, içerisinde çökelti halinde monoklinik veya tetragonal faz içeren kısmi stabilize edilmiş zirkonya tercih edilmektedir. Plazma ile püskürtme yönteminde tungsten katot ve su soğutmalı bakır anot arasında elektrik arkı oluşturulur. Bu ark soy gazı iyonize ederek plazma haline dönüştürür. Toz halindeki kaplama malzemesi yüksek sıcaklıktaki ve yüksek hızdaki gaz plazmanın içerisine enjekte edilmektedir. Böylece toz ergir ve kaplanacak yüzeye yüksek bir hızla püskürtülür. Soy gaz olarak genellikle argon kullanılmakla birlikte gazın ısı özelliklerini arttırmak için kimi zaman hidrojen, azot ya da helyum da ilave edilmektedir. Gazın hızı tabancanın tasarımına, toz boyutuna, miktarına ve akış hızına bağlıdır. Plazmanın çekirdeğindeki sıcaklık 10.000 °C'yi aşabilmektedir. Gazın hızı kimi zaman süpersonik olmakla birlikte partiküllerin hızı ortalama 300 ms⁻¹ civarındadır [8,11,17-19].

Bu tez çalışmasında; ağırlık %8 yttria (Y₂O₃) ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya tozları, yaşlandırma ısı işlemine tabi tutulmuş (T6) 6063-T6 alüminyum alaşımı altlık üzerine plazma püskürtme yöntemiyle püskürtülerek kaplanmış, böylece mekanik özelliği geliştirilmeye çalışılmıştır. Üretilen kaplanmış malzeme, kaplanmamışıyla karşılaştırmalı olarak; sertlik, darbe dayanımı, aşınma dayanımı ve sürünme dayanımı özellikleri açısından incelenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Ekstrüzyonla şekillendirmede -profil, boru, çubuk, lama üretimi ile- en çok kullanılan alüminyum alaşımlarından birisi olan 6063 alaşımı, çökelme sertleştirilmesi (yaşlandırma) ısıtıl işlemi ile sertleştirilebilen alüminyum alaşımları grubundandır. Biçimlenebilme kabiliyeti yüksek olan, ısıtıl işlem ile mekanik değerleri önemli ölçüde arttırılabilen bu alaşım, genel olarak Tablo 2.1' den de görüleceği üzere bir Al-Mg-Si alaşımıdır [20].

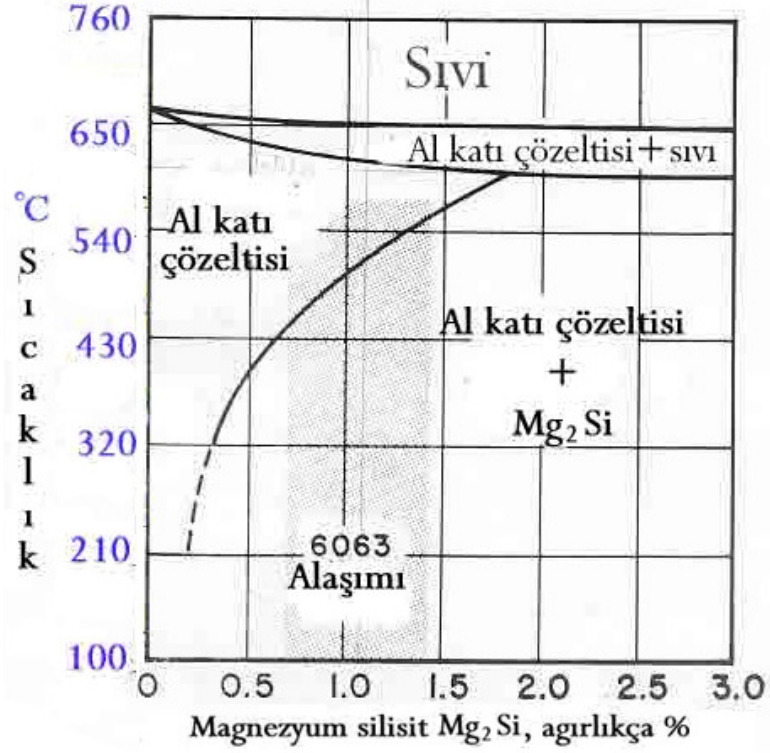
6063 alaşımının, ekstrüzyon yöntemiyle üretilen profillerinin en yaygın kullanıldığı sektörler, inşaat/mimari (cephe kaplama, pencereler, kapılar, dekorasyon, mobilya), otomotiv, elektrik/elektronik ve makine imalat sektörleridir. 6063 alüminyum alaşımının eloksal (anodik oksidasyon) kaplanabilme özelliği de son derece iyidir[20].

Tablo 2.1. 6063 alaşımının kimyasal bileşimi [1].

Element	Ağırlıkça yüzde
Si	% 0,20-0,60
Mg	% 0,45-0,90
Fe	Max. % 0,35
Cr	Max. % 0,10
Cu	Max. % 0,10
Mn	Max. % 0,10
Ti	Max. % 0,10
Diğer	Her biri % 0,05, toplam %0,15

Alaşım elemanlarının geniş sınırlara sahip olması nedeniyle, üreticiler, daha yüksek dayanım, daha iyi yüzey kalitesi veya daha üstün ekstrüze edilebilme açısından, alaşımın kullanım yerine uygun olarak daha dar sınırlı kimyasal bileşimler kullanırlar [20].

Tablo 2.1’de görüldüğü gibi, Mg ve Si esas alaşım elementleri olup, Fe kontrolü gereken bir empüritedir. Cr, Zn gibi diğer elementler daha minör empüritelerdir. Alüminyum içindeki Mg ve Si, Mg_2Si bileşiğini oluştururlar [20].



Şekil 2.1: Al-Mg₂Si faz diyagramı [20].

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi alaşım, solvus eğrisinin altındaki bir sıcaklığa düştüğünde, Mg_2Si çökeler. Çökelen partiküllerin miktar ve büyüklüğü zaman ve sıcaklığa bağlıdır. Üst sıcaklık derecelerinden yavaş soğuma yapılırsa, büyük partiküller çökeler. Solvus sıcaklığının yukarısından oda sıcaklığına ani soğutma, magnezyum ve silisyumun çözelti içinde kalmasına ve aşırı doymuş bir katı çözelti oluşmasına neden olur [20]. Bu aşırı doymuş katı çözelti, 204°C ’nin altındaki bir sıcaklığa çıkarılıp belli süre tutulursa, mikroskobik ölçülerdeki Mg_2Si partikülleri çökeler ve "çökeltme sertleşmesi (yaşlanma)" etkisi ile malzeme sertleşir. YMK kafes yapısına sahip alüminyum sünek ve yumuşak yapısıyla, talaş kaldırma kabiliyeti zayıf bir malzemedir. Birçok olumlu özelliklerine rağmen bu durum alüminyumun teknik açıdan kullanımını kısıtlayan önemli bir unsurdur. Yaşlandırma ile sertleştirilebilen 6063 alaşımının endüstrideki önemi, mukavemetinin dolayısıyla da talaş kaldırma kabiliyetinin geliştirilebilmiş olmasından kaynaklanmaktadır [20].

Fe, gerek alüminyum, gerekse de silisyum ile birleşerek, döküm işlemi sırasında göreceli olarak çözünmeyen çeşitli intermetalik ötektik yapılar oluşturur. Bu yapılar, bir denge fazı olan αAlFeSi 'ye dönüşmeye eğilimlidirler [20]. Tipik bir 6063-T6 alüminyum ekstrüzyon ürünü, alüminyum katı çözeltisi (matriks) αAlFeSi ve Mg_2Si çökelti partiküllerinden (mikroskopik ölçüde) oluşur. Mg_2Si çökelti partikülleri, normal mikroskop ile görülemeyecek kadar küçük olduklarından elektron mikroskobu ile görülebilirler [20].

2.2 YÜZEY İŞLEM TEKNİKLERİ

2.2.1 Yüzey İşlem Teknikleri Hakkında Genel Bilgiler

Çeşitli teknikler uygulanarak, malzemelerin optimum çalışma özelliklerini geliştirmek için yüzey işlemleri ve/veya kaplamaları tatbik edilir. Metal alaşımlarına veya metal dışındaki diğer malzemelere uygulanan yüzey tekniklerinin amacı çeşitlidir. Bu amaçlardan başlıcaları; aşınmaya, korozyona, ısı etkilere ve benzeri dış etkilere karşı malzemeyi korumaktır [21].

2.2.2. Yüzey Kaplamaları

Yüzey kaplamaları kullanılan malzeme cinsine göre 2 sınıfa ayrılır. Bunlar; metalik kaplamalar ve metalik olmayan kaplamalardır. Metalik olmayan kaplamalar yine kendi aralarında iki gruba ayrılır. Bunlar ise; anorganik kaplamalar ve organik kaplamalardır.

2.3. METAL YÜZEYLERİNİN SERAMİKLE KAPLANMASI

2.3.1 Seramik Kaplama Malzemeleri

Seramik kaplama malzemeleri makine parçalarının daha yüksek mukavemete ihtiyaç duyduğu, daha yüksek sıcaklıkta çalışmalarının gerektiği ve korozyon dayanımlarının daha yüksek olması gerektiği yerler için geliştirilmiştir. Seramik kaplama

malzemelerinin kullanımlarında temel ihtiyaç, tamamıyla seramikten yapılmış malzemelerin mekanik özelliklerindeki dezavantajlar nedeniyle doğmuştur. Ayrıca metalik malzemeler üzerine yapılan seramik kaplamalar, parça ömrünü uzatarak, ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır [18,21,22].

Değişik kaplama teknikleri kullanılarak çeşitli oksit, karbür ve nitrür ihtiva eden sert kaplamalar, metaller üzerine uygulanabilmektedir [18]. Değişik amaçlar için farklı kaplama teknikleri kullanılır. En çok kullanılan kaplama tekniği, toz halindeki seramik malzemelerin ısıp püskürtme usulleriyle metal yüzeyine tutturulmasıdır. Ergiyebilen herhangi bir malzeme ark, alev veya detonasyon teknikleriyle püskürtülebilir. Plazma yönteminde sıcaklığın önemi olmamasına rağmen çalışma atmosferi önemlidir [21,23].

Seramik kaplamaların toz halindeki üretimi ve tüketimi kolay olduğundan bu şekilde kullanımı çok yaygındır. Seramik tozlar oksit, karbür, nitrür, borür formunda olduğu gibi karışık formda da olabilmektedir. En çok kullanılan seramik tozlar oksit ve karbür formunda olanlarıdır. Oksit formundaki seramik tozlara kıyasla borürler, nitrürler ve karbürler zor ergirler. Bu sebepten dolayı oksit formundaki tozların ısıp püskürtme teknikleriyle kullanımı yaygındır.

Karbürler oksitlerden sonra en çok kullanılan seramik kaplama malzemeleridir. Kolay ergimeyen bazı karbürler PVD ve CVD teknikleriyle kaplanabilir. Ergiyebilen karbürler ise detonasyon, alevle püskürtme, plazma püskürtme teknikleriyle kaplanarak kullanılabilirler.

Oksit esaslı seramik malzemeler en çok kullanılan seramik kaplama malzemeleridir. Özellikle de zirkonya, alümina, kromoksit ve titanyumdioksit, oksit esaslı seramik kaplama malzemelerinin başlıca olanlarıdır [21,23].

Zirkonya (ZrO_2) kullanım yerleri ve kendine has malzeme özellikleri bakımından oldukça ilgi çekicidir. Zirkonyanın en önemli koruyucu özelliği yüksek sıcaklıklardaki ısıp bariyer koruyucu özelliğidir. Zirkonyanın seramik kaplama malzemesi olarak kullanıldığından beri bu özelliği ön plana çıkmıştır. Zirkonya ısıp püskürtme tekniklerinin birçoğuyla metallerin yüzeyine kaplanabilir. Bu kaplamaların yoğunluğu, gözeneklerin fazla olması nedeniyle düşüktür. Zirkonya bulunduran seramiklerin ergime

noktası yüksektir. Asidik kimyasal maddelere karşı dirençlidir, korozyon ve erozyon dirençleri de iyidir. Isıl şoka dayanıklıdırlar.

Zirkonyanın diğer oksitlerle kıyaslandığında; örneğin alüminanın sahip olmadığı üç temel özelliği gösterir. Birincisi ergime noktası alüminadan yaklaşık 500°C daha fazla olduğundan daha iyi refrakterlik gösterir. İkincisi metallere karşı düşük sürtünme katsayısından dolayı iyi yüzey işlemi verir. Üçüncüsü de 500°C 'nin üstündeki sıcaklıklarda oksijen iyon iletkeni olarak kullanılabilir. Bunların yanında zirkonyanın, alüminanın kullanılmasının yeterli olduğu yerlerde daha iyi özelliklerine rağmen kullanılmamasının nedeni maliyetinin yüksek oluşudur [21].

Alümina, oksit esaslı seramik malzemelerinin en önemlilerindendir. Ergime noktası 2000°C civarında olan alümina, vasat sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik yüklere karşı en dayanıklı refrakter malzemelerden birisidir. Kullanımındaki sınırlama diğer oksitlere nazaran düşük ergime sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Saf alümina, düşük sıcaklıklarda birkaç formda bulunur. Bu yapılar zaman, kristal boyutu ve atmosfere bağlı olarak 1000-1200°C'de α -alüminaya dönüşmeye başlar. 1600°C 'nin üzerinde yapılan ısıtma bu dönüşümü hızlandırır. Alüminanın α -fazının dönüşümü tersinir değildir.

Krom oksit yeşil renkli stokiometrik bir oksit olmasına rağmen genellikle $\text{Cr}_2\text{O}_{3-x}$ şeklinde hipostokiometrik şekilde bulunur. Hipostokiometrik tabakalar metalik bir karakter taşır ve korozyon dirençleri zayıftır. Buna karşılık krom oksit kaplamalar çok serttir, aşınma dirençleri çok yüksektir ve gözeneklilikleri çok düşüktür. Püskürtülerek gerçekleştirilen krom oksit kaplamalarda kararsız fazlar meydana gelmez [21].

2.3.2. Zirkonya

Bir oksit seramiği olan zirkonya, yüksek dayanım, mükemmel aşınma direnci, yüksek sertlik, mükemmel kimyasal direnç, yüksek tokluk, refrakter özelliği ve iyi oksijen iyon iletkenliği gibi birçok üstün özellik gösterir. Zirkonya, uygun tane boyutuna bağlı olan yüksek dayanım ve kırılma tokluğuyla bağdaşmış yüksek sertlik özelliklerinden dolayı, bıçaklarda, makaslarda, sert ve kaba materyalleri kesmede kullanılan jiletlerde kullanılabilir. Polimorf zirkonya, yüksek sıcaklık kristal yapıları olan tetragonal ve

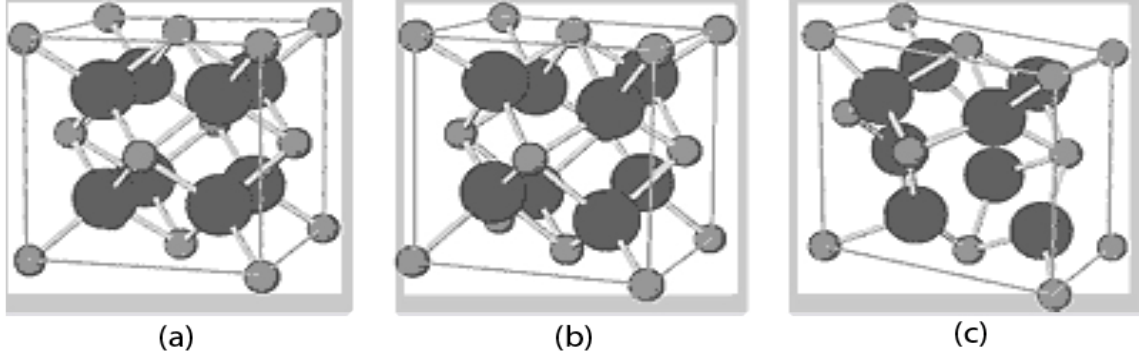
monoklinik formlarından faz dönüşümü ile tokluğu geliştirilebildiği için özel bir malzemedir. Aynı zamanda, kimyasal direnç, yüksek sertlik ve aşınma direnci, kaygan yüzeylerde sürtünmeyi minimize etmek üzere iyi yüzey işleme ve montaj sırasında veya operasyonda darbeden dolayı oluşan hasarı önlemek için yüksek tokluk özellikleri nedeniyle contalarda, valflarda ve pompa çarklarında kullanılabilir. Kimyasal kararlılığı ve biyo uyumluluğu sebebiyle ortopedik implantlarda, ısıl şok ve aşınma direnci sebebiyle refrakter uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca dirençli ısıtma elemanları, oksijen sensörleri ile katı oksit yakıt hücrelerindeki elektrolitler de zirkonyadan yapılabilir. Zirkonyanın bu tip elektriksel ve elektronik uygulamaları oldukça yüksek elektronik iletkenliğine ve tamamen stabilize edilmiş malzemenin yüksek oksijen iyon iletkenliğine bağlıdır [24].

Zirkonya (ZrO_2) üç farklı kristal yapıya sahip, allotropik (polimorf) bir malzemedir. Bu kristal yapılar; monoklinik (m), tetragonal (t) ve kübiktir (k). 1970'lerde zirkonyanın çatlak ilerlemesine karşı direnç sağlayan dönüşüm toklaşması mekanizması (transformation toughness) özelliği gösterdiği bulunmuştur. Zirkonyanın bu özelliğini sağlayan yarı kararlı tetragonal ve kübik formların gerilmelere maruz kalınca oluşan enerjiyi absorbe ederek oda sıcaklığında kararlı monoklinik faza martensitik dönüşümün meydana geldiği dönüşüm toklaşmasıdır. Dönüşüm tokluğunun, tane boyutundan, tane boyut dağılımından ve stabilizör içeriğinden etkilendiği sonucuna varılmıştır [17].

Oda sıcaklığında, zirkonya seramikleri, yarı kararlı faz olan tetragonal ve kararlı faz olan monoklinik olmak üzere iki polimorf gösterirler. Saf ZrO_2 aşağıdaki dönüşümleri gösterir :

Monoklinik $\leftarrow (950^\circ C) \rightarrow$ Tetragonal $\leftarrow (2370^\circ C) \rightarrow$ Kübik $\leftarrow (2680^\circ C) \rightarrow$ Sıvı

Zirkonya seramiklerin mekanik ve proses özellikleri açısından dönüşümleri önemlidir. t-m dönüşümü soğutma sırasında $\sim 950^\circ C$ 'de ve tersi şekilde ısıtırken $\sim 1170^\circ C$ 'de gerçekleşir. k- ZrO_2 sadece $\sim 2300^\circ C$ 'den erime noktasına olan $\sim 2680^\circ C$ 'ye kadar kararlıdır.

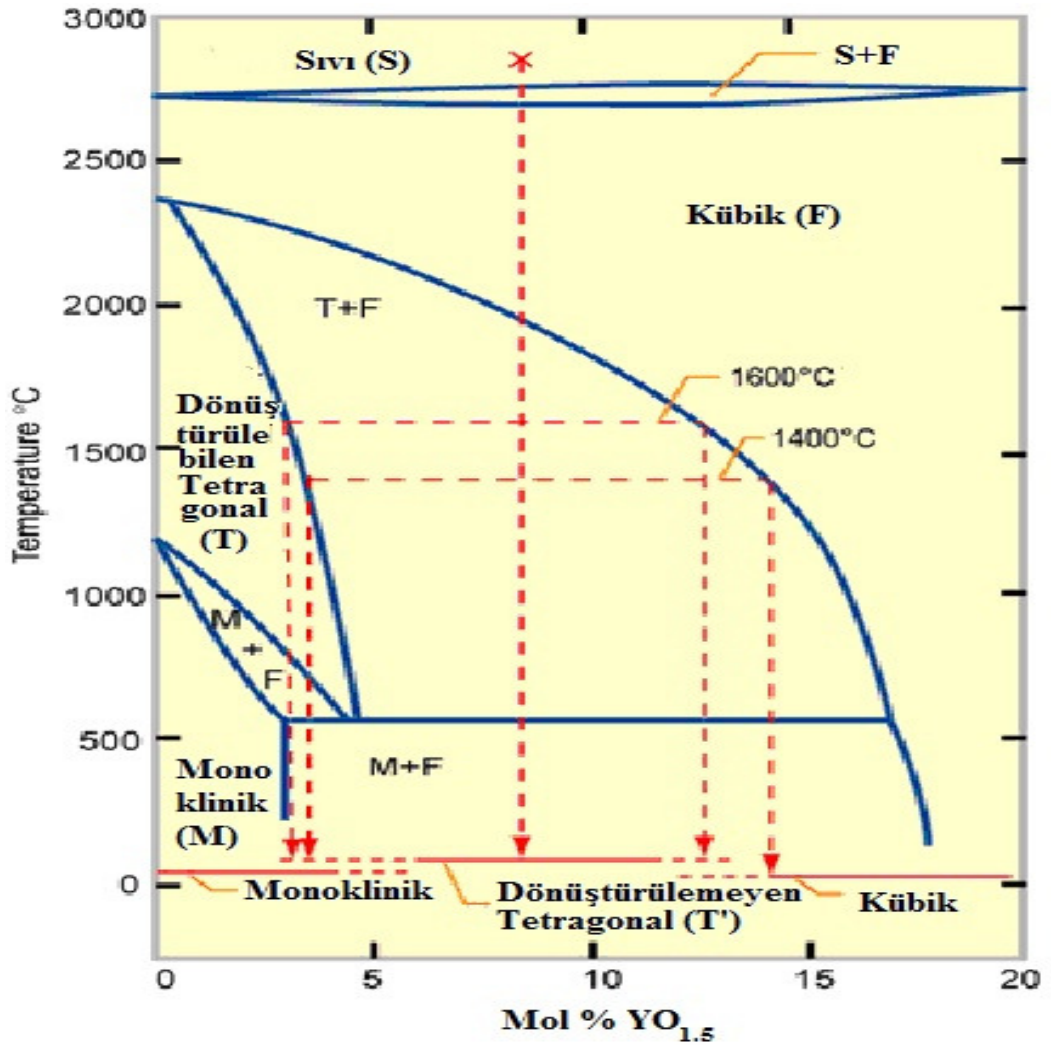


Şekil 2.2: Zirkonyanın kristal yapıları; a) Kübik (k-ZrO₂), b) Tetragonal (t-ZrO₂), c) Monoklinik (m-ZrO₂) [24].

Saf zirkonya oda sıcaklığında kırılğan ve daha düşük dayanıma sahip monoklinik yapıdadır [24].

2.3.2.1. Kısmen Stabilize Edilmiş Zirkonya Seramikleri

Önceden de belirtildiği gibi zirkonya polimorf olup, farklı fazlara sahiptir. Faz dönüşümü sırasında hacimsel değişimler neticesinde zirkonya deforme olur. Faz dönüşümleriyle ortaya çıkan bu olumsuzluk stabilizör kullanılarak önlenabilir. ZrO₂ seramiklerinde MgO, CaO, Y₂O₃, CeO₂ gibi stabilizörlerin kullanılmasının sebebi sinterlemeden sonra oda sıcaklığında daha fazla tetragonal ve/veya kübik fazı tutmalarıdır. Yttria, tetragonal faz dönüşebilirliğinde olumlu etkiye sahip olduğu ve tokluğu sebebiyle zirkonya seramiklerinde kullanılan en popüler stabilizördür. Yttria ile stabilize edilmiş ZrO₂ seramik tozları çoğunlukla çökelme yöntemiyle hazırlanır ve sinterlenir [21,25]. Şekil 2.3'de ZrO₂-Y₂O₃ ikli denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.3: $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ ikli faz denge diyagramı [26].

Diğer bir yandan CeO_2 stabilizörlü Ce-TZP seramiklerinde tetragonal fazın dayanımı yükselmiştir ve bu seramikler yüksek kırılma tokluğu gösterirler ve bu tane boyutları arasındaki farklılığa bağlanabilir. Fakat bu seramiklerin mukavemetleri daha düşük ve dinamik tane büyümeleri çok güçlüdür.

Konvansiyonel toz presleme ve sinterleme işlemleriyle üretilen bu malzemeler, tamamen stabilize edilmiş malzemeler olarak adlandırılır. Özellikle 800-1100 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklar arasında tamamen stabilize olmuş malzemelerdeki stabilizörlerin yavaşça bozulabilmeleri nedeniyle yüksek sıcaklıklarda uzun süreli tamamen stabilize hal garantili değildir. Örneğin; sadece MgO ile stabil hale getirilen malzemeler kolaylıkla destabilize olmaktadır [21].

Tamamen stabilize olmuş malzemeler, oksijen problemlerinin (gaz-buhar atmosferinde oksijen kısmi basıncını kayıt eden aletler), küçük devrelerin ve benzeri malzemelerin üretilmesinde ve yüksek sıcaklıkta hava atmosferinde işlem gören ısıtma elemanlarında kullanılırlar. Tamamen stabilize edilmiş zirkonyanın mekanik özellikleri zayıf olduğundan, mekanik özellikleri daha iyi olan kısmen stabilize edilmiş zirkonyalar kullanılmaktadır [21,25].

Yeterli stabilizör içermeyen, tamamen stabilize etmek için etkili olmayan malzemeler bulunduran zirkonya malzemeler kısmen stabilize zirkonya (partially stabilized zirconia-PSZ) olarak bilinir. Oda sıcaklığında matris malzeme stabil kübik yapıdadır, geri kalan taneler çökelti faz halinde monoklinik yapıda zirkonyadır.

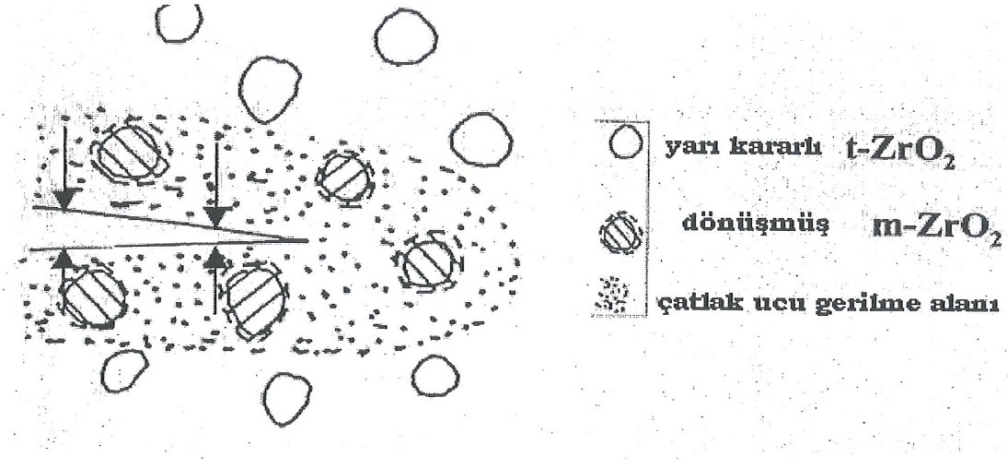
Kısmen stabilize olmuş ZrO_2 malzemelerinin tokluğunun geliştirilmesi, çok iyi sıcaklık kontrolü yapılmış atmosferde 1300-1400°C 'ler arasındaki kübik faz içerisine çok ince tetragonal fazların çökertilmesi esasına dayanır ve yapı stabildir. Takip eden soğutma işlemi, ince boyuttaki çökeltilerin monoklinik yapıya dönüşümünü önler. Bununla beraber, serbest yüzeylerin komşuluğunda (çatlak oluşumu gösterebilecek) dönüşüm hacim artışına neden olabilir ve bu yerlerde yüzeyler basınç altındadır. Sonuç olarak çatlağın oluşumuna sebep olmak daha zordur. Malzeme, sinterlenmiş haldeki tamamen stabilize ve kısmen stabilize haldekilerle karşılaştırıldığında nispeten daha dayanıklı ve tok gözüktür. Bu şekilde mukavemetlendirilmiş zirkonya malzemelerin darbe dayanımları yüksektir.

Son zamanlarda tetragonal zirkonya polikristali (tetragonal zirconia polycrystal-TZP) şeklinde bilinen malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler çok ince başlangıç toz boyutundaki zirkonyanın sıcak preslenmesi veya sinterlenmesiyle üretilir, çok ince mikron altı tane boyutlarının varlığı soğutma sonucu monoklinik yapıya faz dönüşümüne uğramaz. Tokluk ve mukavemet, kısmen stabilize edilmiş (PSZ) zirkonyada yapıldığı gibi yükseltilir ve mukavemet yüksek değerlere ulaşır. Her şeye rağmen bu tip malzeme yüksek oranda kararsızdır. Özellikle yükselen sıcaklıklarda ve nem mevcudiyetinde yüzeyde kontrolsüz destabilizasyon eğilimi vardır. Mevcut araştırmalar stabilitenin artırılmasındaki metodlarda olduğu gibi yüzey kompozisyonunun değiştirilmesiyle dönüşümün önlenmesini amaçlamaktadır [21].

Zirkonya ile güçlendirilmiş seramik kompozitlerin (zirconia toughened composites-ZTC) mikroyapısı, disperse olmuş zirkonya fazı içeren seramik matrisinden oluşur. En çok incelenen zirkonya ile güçlendirilmiş alüminadır (zirconia toughened alumina-ZTA). İçinde az miktarda ZrO_2 , Al_2O_3 matrisine dağıtılmıştır. Matrisin ve dağılmış fazların ısı genleşme katsayısı farklıdır ve bu farklılık birtakım iç gerilemelere yol açabilir. Bu iç gerilemeler, sinterleme sıcaklığından soğutma sırasında zirkonya parçacıklarının stabilitesini kontrol edebilir. Çoğunlukla, ZTC materyalleri kesme araçlarında, hassas makaralarda, ısı işlem uygulanan ocakların taşıyıcı zincirlerinde olduğu gibi abrasif aşınma dayanımı aranan yerlerde kullanılır.

2.3.2.2. Dönüşüm Toklaşması

Zirkonyada martensitik dönüşüme benzer (tetragonal ve/veya kübik $\rightarrow$ monoklinik) dönüşüm, dönüşüm toklaşması denen etkiyi yaratır. Termodinamik olarak yarı kararlı bir halde tutulmuş tetragonal zirkonya fazı ilerleyen bir çatlak etrafında oluşan gerilme alanında, gerilme enerjisini absorblayıp dönüşümde kullanarak, kararlı monoklinik yapıya dönüşür. Bu durum Şekil 2.4 'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Çatlak ucu deformasyon alanında tetragonal $\rightarrow$ monoklinik zirkonya faz dönüşümünün (transformation toughness) şematik gösterimi [24].

TZP seramiklerinde oda sıcaklığında tetragonal faz yarı karardır. Termodinamik olarak daha kararlı olan monoklinik faza dönüşüm için itici kuvvet, çevreleyen matrisin hacminde artış meydana getirerek sınırlaması ile olur. Eğer matrisin sınırlaması bir şekilde serbest kalırsa veya tetragonal taneler yeterli enerji elde ederlerse monoklinik

faza dönüşüm meydana gelir. Dönüşümle beraber hacimsel genleşme, gerilme ucunda basma gerilmesine neden olur ve çatlağın daha fazla ilerlemesi için gerekli kırılma enerjisini yükseltir. Bu mekanizme seramiklerin kırılma tokluğunu arttırıcı bir yöntem olarak kullanılır ve tokluğu iki katından fazla kat yükseltilebilir [12, 13, 17, 24].

2.3.2.3. Düşük Sıcaklık Bozunma Mekanizması Veya Yaşlanma

Düşük sıcaklık bozunması 100-300°C 'lık sıcaklık aralığında bozunma sırasında zamana bağlı tetragonal faz dönüşümüdür. Taneler daha kaba olduğu zaman, tane dönüşüm eğilimi yüksek olur. Tane boyutunun büyümesi tetragonal zirkonya kararlılığını düşürür. Böylece zirkonya yüzeyinde, tetragonal tanelerin monoklinik faza dönüşümü meydana gelir. Dolayısıyla yüksek stabilizör miktarı ve daha ince taneler, dönüşüme karşı olan direnci arttırır. Aynı zamanda yüksek iç gerilimler dönüşüm hızını arttırabilir. Dönüşümle birlikte hacim artar, mikro çatlaklar oluşabilir ve yüzey pürüzlülüğü aşınma hızıyla birlikte artar. Y-TZP de düşük sıcaklık bozunması üzerine yapılan farklı deneylerden çıkarılan sonuçlar; oda sıcaklığında dönüşümün yavaş olduğu ve azami hızının 200-300°C 'de olduğu; dönüşümün suda veya su buharında daha hızlı olduğu; dönüşümün yüzeyde başlayıp örneğe doğru genişlediğidir [24].

2.3.3. Seramik Kaplama Teknikleri

Yüzyıllardır insanlar kullandıkları malzemelerin yüzey özelliklerini kaplamayla veya diğer yöntemlerle değiştirmeye ve geliştirmeye çalışmaktadırlar.

Malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirmenin temel amaçları;

- Yüzeye sertlik, aşınma ve sürtünme direnci, elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık gibi farklı mühendislik özelliklerini kazandırmak,
- Yüzeyin korozyon direncini arttırmak,
- Yüzeye dekoratif çekicilik kazandırmaktır.

Metalik malzemelerin üzerine seramik kaplama teknikleri 1970'li yıllardan itibaren oldukça önemli gelişmeler kaydetmiştir. Bunun nedeni gelişen teknolojiyle birlikte kullanılan metal ve alaşımlarının değişik ortamlarda yüksek performans

gösterebilmelerinin istenmesidir. Metalik malzemenin seramik ile kaplanmasıyla performanslarının artışı başlıca şu özelliklerinin geliştirilmesiyle olmuştur;

- Aşınmaya karşı direnç,
- Korozyona ve oksidasyona karşı direnç,
- Isı iletimlerinin düşük oluşu.

Son yıllarda ileri seramiklerin yüksek iyonik ve kovalent bağ enerjilerine dayanan üstün özelliklerinin birleştirilmesiyle yeni seramiklerin üzerinde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu yüksek iyonik ve kovalent bağlarından dolayı ileri seramikler iyi refrakterlik, kimyasal kararlılık, sertlik, mekanik mukavemet ve sürtünme direnci gibi özelliklere sahiptir. İleri seramikler plastiklerin kullanılmadığı yüksek sıcaklıklarda, metal ve alaşımlarının korozyon veya yumuşama nedeniyle performanslarının yetersiz olduğu yüksek sıcaklıklarda rahatlıkla kullanılabilirler. Diğer malzemelerle karşılaştırıldığında maliyet/performans özellikleri de dikkate alınarak seramiklere doğru ilgi artmaktadır. Seramik malzemeler gerek kendi başlarına, gerekse diğer malzemelerle yaptığı kompozitler veya kaplamalar şeklinde kullanılmaktadırlar.

Çeşitli refrakter seramiklerin üretim kolaylığına karşın konvansiyonel üretim prosesleriyle yoğun (daha az poroziteli) yapı eldesi zordur veya mümkün değildir. Üniform olmayan şekilli malzemelerin minimum nihai işlemle veya nihai işleme gerek olmadan da uygulama kolaylığı değişik kaplama prosesleriyle mümkündür. Pahalı ve stratejik malzemeler kullanıldığında bu malzemelerin dikkatlice daha az miktarda kullanımı da kaplama prosesiyle mümkündür. Bu şartlar göz önüne alındığında kaplamaların ekonomik olarak uygun olması avantajı vardır [21,27].

Metallerin yüzeylerinin seramikle kaplanmasında kullanılan teknikler çok çeşitlidir. Bunlardan belli başlı olanlar şöyledir; fiziksel buhar çöktürme (PVD), kimyasal buhar çöktürme (CVD), sol-jel (SG), plazma püskürtme (PS), alevle püskürtme (FS), sıcak izostatik presleme ile kaplama (HIP), detonasyon tabancası (DG) [21,28].

Sert seramik kaplama yüzeylerinin aşınmasına ve erozyonuna birçok faktör tesir eder. Statik yüklere maruz kalan metal yüzeylere aşınma direnci göstermesi amacıyla kullanılan seramik kaplamaların dinamik yükler altındaki metal yüzeylere

kullanılmasıyla ilgili çalışmalar devam etmektedir. Pistonlar, valfler, matkaplar, klavuzlar üzerine TiN, TiC, Ti(CN), TiB₂ gibi kaplamalar uygulanmaktadır.

Isıl püskürtme ve CVD seramik kaplama teknikleri özellikle korozyon direnci için geliştirilmektedir. Al₂O₃/Cr₂O₃ karışımının plazma püskürtme ile kaplanması suretiyle korozif/erozif sıvılarda çalışan pistonlu pompalar korunur. CVD ile oluşturulan SiO₂ ve TiO₂ filmler Fe-Ni-Cr alaşımları korumak için geliştirilmektedir. 30 µm kalınlığında CVD ile oluşturulan silika film oksidasyona, karbürizasyona ve 1000³C 'ye kadar karbonun katalitik çözünmesine karşı Fe-Ni-Cr alaşımını koruyabilir. CVD ile oluşturulan TiB₂ filmler alüminyum redüksiyon hücrelerindeki grafit katotları korozyondan korumak için kullanılmaktadır. Yüksek refrakterlikteki TiN, TiB₂ ve ZrB₂ gibi seramikler yüksek sıcaklıkta metaller için uygun birer difüzyon engelleyicidirler. CVD ile oluşturulan SiC çökeltiiler nükleer füzyon teknolojisinde gaz difüzyon engelleyici olarak kullanılırlar ve sıcak korozyonun önlenmesini sağlarlar [23].

Plazma püskürtmeyle seramik kaplamalar birçok metalden daha iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptir ve dizel motorları da dahil, erozyon ve aşınma dirençli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bununla beraber alevle püskürtmedeki kadar olmasada poroziteler nedeniyle plazma püskürtmeyle oluşturulan seramik kaplamalar korozyon için yetersiz kalabilmektedir. Mesela CVD ile oluşturulan Ti(CN) kaplamaların kompresör kanatlarındaki korozyon ömrü plazma püskürtme ile kaplanan malzemelerden daha iyidir [21,23,27].

Borürlerin, oksitlerin, nitrürlerin, karbürlerin büyük bir kısmı miller, kesme takımları, enjeksiyon döküm kalıpları, kompresör kanatları, nozullar, valfler ve pompa elemanları, contaları, tıbbi özellikteki cerrahi aletler ve protezler gibi aşınma uygulamaları için kullanılırlar.

Isıl bariyer amaçlı seramik kaplamalarda ısı genleşme, ısı iletkenlik, aşınma, sürtünme ve korozyon direnci gibi temel malzeme özellikleri oldukça önemlidir. Isıl püskürtme teknikleri (alevle püskürtme, plazma püskürtme gibi) ile oluşturulan ısı bariyer ve korozyona direnç amaçlı seramik kaplamalarda karşılaşılan en büyük problem gerek sıcaklık değişimleri, gerekse yüksek sıcaklık nedeniyle ortaya çıkan seramik kaplama-kaplanacak metalin uyumu ile ilgilidir. Uyumsuzluğu ortaya çıkaran nedenlerden en

belli başlıları ısı genleşme katsayılarının ve ısı iletkenliklerinin farklı olması sonucu seramiğin metal üzerine yapışma (bağlanma) problemidir. Çözüm olarak kaplama malzemesi-kaplanacak metal arasında ara tabaka olarak kullanılacak malzemelerin her ikisinin de ısı özelliklerine yakın özellikte, yani her ikisinin de özellik olarak ortasında olması ve yeni kaplama teknikleri geliştirilmesi sayılabilir. En çok kullanılan seramik kaplama tekniklerinin başında ısı püskürtme teknikleri gelmektedir. Isı püskürtme tekniklerini PVD ve CVD teknikleri izlemektedir [21,27].

2.4. ISIL PÜSKÜRTME TEKNİKLERİ

2.4.1. Isı Püskürtme

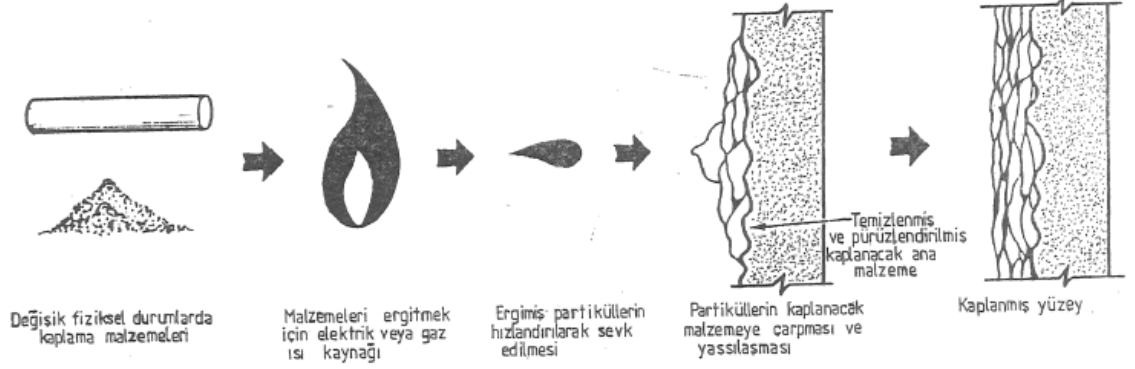
Isı püskürtme kaplamalar, bir alev püskürtme başlığı ile tozu veya teli, ergimiş ya da yarı ergimiş kıvam halinde, uygun gazlar kullanarak, hedef malzemeye püskürtüp, malzemenin yüzeyinde istenen bölgelerin veya tamamının yeni kaplama malzemesi ile değiştirilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Kaplama; metalik, seramik, plastik veya herhangi arzu edilen bir bileşimden veya karışımdan olabilir [21,28].

2.4.2. Isı Püskürtme Teknikleriyle Yapılan Seramik Kaplamaların Özellikleri

Yüzey işlem tekniklerinden biri olan ısı püskürtme tekniği ile seramikler, metaller, plastikler, sermetler gibi değişik kimyasal ve fiziksel kaplama malzemeleri; başta metaller üzerine olmak üzere çeşitli malzemeler üzerine kaplanabilmektedir (Şekil 2.5)[21,23].

Isı püskürtmede; bir cihaz vasıtasıyla kaplama malzemesinin (örneğin seramik) ısıtılması, ergitilmesi, oluşan ergiyik partiküllerinin hızlandırılması ve kaplanacak malzeme yüzeyine sevk edilerek kaplanması olayı meydana getirilir.

Seramik kaplama işi soğuk bir prosestir. Yani kaplanacak malzemeye ayrıca ısı vermek gerekmez. Dolayısıyla ergime sıcaklıkları düşük olan alüminyum gibi metal yüzeylere de ergime sıcaklıkları yüksek olan seramik malzemeler kaplamak mümkündür.



Şekil 2.5: Isıl püskürtme prosesi [21,23].

Isıl püskürtme ile koruyucu seramik kaplama işlemi; kaplanacak yüzeylerin hazırlanması, yüzeylerin kaplanması ve kaplama sonrası yapılan çalışmaları kapsar [18].

2.4.3. Isıl Püskürtme İle Kaplanacak Yüzeylerin Hazırlanması

Isıl püskürtme ile seramik kaplama öncesi yüzey hazırlanmalı, yani pürüzlendirilmelidir. Fakat yüzey hazırlama öncesi yüzey temizleme gerekebilir. Yağ, boya gibi yabancı maddeler kaplanacak yüzeyden uzaklaştırılmalıdır. Hatta kaplanacak yüzeye yakın yüzeylerden dahi bu yabancı maddelerin uzaklaştırılması gerekir. Çünkü kaplanacak malzemenin ısınması neticesinde bu yabancı maddeler kaplanacak alana girebilir.

Yüzey pürüzlendirme tipi ve pürüzlendirme derecesi uygulanan kaplama tipine, kalınlığına ve servis koşullarına bağlıdır. Seramik kaplama yüzeye mekanik bağlanma ile tutunacağından yüzey yeterince pürüzlü hale getirilmelidir. Kaplanacak yüzeyin pürüzlendirilmesi kum püskürtme, yüzeyin torna v.b. makinelerle diş açarak, tıg çekerek, tırtıl çekerek, V kanalı açarak ve ara bağlayıcı tabaka oluşturarak pürüzlendirilmesi sayılabilir [21,29].

2.4.4. Isıl Püskürtme İle Yapılan Seramik Kaplamaların Teşekkülü

Soğuk bir proses olan seramik kaplama prosesinde kaplanacak malzeme ısıtılmaz. Çünkü bağlanma mekanizması mekaniktir. Püskürtülen ergiyik seramik taneciklerin

kaplanacak malzeme yüzeyine değmeleri ile ortaya çıkan büzülme sonucu yüzey ile bir gerilme oluşur. Böylelikle tutunma imkanları ortaya çıkar. Yüzey pürüzlendirilerek meydana getirilen pürüz tepeleri ile büzülme kuvvetinden ötürü tutunabilir hale gelirler.

Seramik kaplama malzemesinin ergiyik hale geçip kapanacak malzeme yüzeyine çarpana kadar ergiyik halini koruması gerekir. Zira zayıf kaplama çökeltisi-kapanacak malzeme bağı termomekanik yük altında çökeltinin pul pul dökülmesiyle sonuçlanacak korozyon tipi hatalar oluşabilir.

Seramik kaplama ve kapanacak yüzey arasındaki bağlanmada 3 temel kategoriden biri olan mekanik bağlanma (mekanik kilitlenme) mekanizması daha hakimdir. Bu 3 temel kategori; mekanik bağlanma, metalurjik bağlanma ve fiziksel bağlanmadır.

Mekanik bağlanmada ergimiş partiküllerin pürüzlendirilmiş yüzeye çarpışıyla yüzey topografisinin çıkıntıları ve kaplama çökeltisi arasındaki mekanik kilitlenmeyle bağlanma olduğu kabul edilir. Metalurjik bağlanma ise kapanacak yüzey ile kaplama malzemesi arasındaki difüzyon ile veya kapanacak ve kaplama malzemesi arasındaki ara bileşenlerle meydana gelir. Fiziksel bağlanma mekanizması ise 3. Tip bağlanma mekanizmasıdır. Burada kaplama çökeltisi ve kapanacak malzemeler arasındaki Van der Waals kuvvetlerinin hareketi ile bağlanma oluşur. Moleküller ve atomlar arası çekme kuvvetlerinden kaynaklanan bağ kuvvetleri fiziksel bağlanmanın temelidir [21,23].

Seramik kaplama ve kapanacak malzeme arasındaki bağlanmada genelde iki veya daha fazla bağlanma mekanizmasının aynı anda çalışması söz konusu olabilir. Fakat hakim olan mekanik bağlanma mekanizmasıdır [21,29].

Seramik kaplaması tane tane oluşturulur ve sonuçta tabakalı bir yapı meydana gelir. Isı transferi hesaplarından çıkan sonuçlara göre ergiyik partiküllerin donması birkaç mikrosaniyede olur. Tamamen katılaşma ve soğuma ise sadece 100 mikrosaniyede gerçekleşir. Bağlanma mekanizmasının mekanik bağlanma oluşunun bir kanıtı da bu hesaplardır

Seramik kaplamalar sonuçta gözenekli bir yapı oluşur. Eğer gözeneklilik yüksek ise (%20'ler civarında) bu ısı bariyer amaçlı seramik kaplamalar için arzu edilen bir özellik

olmasına rağmen genellikle seramik kaplamaların mukavemetini azaltan bir yönü de bulunmaktadır. Çünkü seramik kaplama malzemesi ile kaplanacak metal yüzey arasındaki bağlanma gözeneklilik nedeniyle azalmaktadır. Seramik kaplamanın püskürtme şartlarına bağlı olarak gözeneklilik miktarı %3 civarlarına inebilmektedir. Gözeneklilik miktarı düşük seviyede kaplama eldesi seramik kaplama malzemelerinin ergiyik halde kalma süresine, ergiyik partiküllerinin hızlarına, ergiyik partiküllerinin yörüngesi gibi şartlara bağlıdır.

Seramik kaplama uygulamalarında seramik tozların sabit hızda üniform dağılımı için toz besleyici de diğer parametreler kadar önemlidir. Seramik kaplama tozlarının kaplanacak metal yüzey üzerine otomatik veya yarı otomatik bir yöntemle püskürtülebilmesi, elle yapılan seramik kaplamalardaki kaplama parametrelerinin kontrol zayıflığını minimuma indirecektir.

Kaplama, kaplanacak malzeme yüzeyine dik bir şekilde tutulan püskürtme tabancası ile yapılmalıdır. Çünkü kaplamanın yapısı tabanca ile kaplama yüzeyi arasındaki açıya bağlıdır. Tabanca ile kaplanacak metal yüzeyi arasındaki açı 45° 'den az olmamalıdır. Açıyı 45° gibi küçük değerlere indirmek seramik ergiyik partiküllerindeki hız artışına bağlıdır. Eğer partiküller iyi ergimişse ve partikül hızları 20-150 m/s arasında ise açı 60° 'ye kadar düşebilir. Püskürtme hızı yüksek olan detonasyon tabancası ile yapılan kaplamalarda kaplanacak malzeme ile tabanca arasındaki açı 45° 'ye kadar inebilmektedir. Püskürtme tabancası ile kaplanacak yüzey arasındaki bu açı ilişkisi, özellikle dar açılı karışık şekilli parçaların kaplanmasında problemlere neden olmaktadır.

Isıl püskürtme ile kaplama başladıktan sonra tamamıyla kaplama kalınlığı elde edilinceye kadar işlem kesilmemelidir. Fakat ana malzemenin özelliklerine zıt etki yapabilecek veya kaplamanın verimine zıt etki yapabilecek aşırı ısınmadan kaçınmak için tedbirler alınmalıdır. Şayet püskürtmenin aniden durdurulması kaçınılmazsa iş parçasının sıcaklığının düşmesinden kaçınılması gerekir. Kaplamanın uygulanması sırasında püskürtmeyle kaplamanın kirlenmesinden her an kaçınılmalıdır.

Eğer seramik kaplanması istenmeyen yüzeyler varsa bu koruyucu macun, maske, bant tipi maddelerle kapatılmalıdır.

Çeşitli ısıl püskürtme yöntemlerinin birbirlerinden farklı, kullanılan tekniği karakterize eden özellikleri vardır. Çeşitli ısıl püskürtme tekniklerinin karakteristik özellikleri görülmektedir. Isıl püskürtme ile yapılan seramik kaplamalar kullanılan seramik malzeme ve yönteme bağlı olarak belli oranlarda yüzey pürüzlülük değerlerine sahiptirler. Özellikle seramik kaplı yüzeylerdeki aşınma davranışı için pürüzlülük değerleri etkili olabilir [21,23].

2.5 PLAZMA PÜSKÜRTME KAPLAMA PROSESİ

2.5.1. Plazma

Plazma, iki elektroda voltaj uygulandığında, bir elektrik akımı iletebilecek kadar yeterli elektron ve iyonlara sahip olan gazdır. Plazmalar, günlük yaşamda floresan ışıkları, sodyum buhar lambaları ve neon ışıklarında kullanılır.

Enerji yüklü elektron, bir atoma çarparsa onu daha yüksek enerjili seviyeye çıkartır. Bu elektron kendiliğinden daha düşük enerji seviyesine düşer ve atom belli dalga boyunda atomun özelliğini belirleyecek şekilde ışıma yapar. Yüksek seviyelerden indirgenen elektronlar atomun özelliğine bağlı olarak bir spektrum verirler. Atomun, dıştaki elektronlarının yükseltgenme ve indirgenmesi görünür bir spektrum oluşturur ($4100\text{\AA}$ 'den $7200\text{\AA}$ 'e ya da $3,0\text{eV}$ 'tan $1,7\text{eV}$ 'a) ve bu da plazmanın özelliğini (rengini) belirler. Atom çekirdeğine yakın olan elektronların indirgenmesi, ultraviyole ışımasına ve hafif X-ışınlarının oluşmasına sebep olur. Aşağıda, soğuk plazma renkleri görülmektedir.

- Argon-Menekşe rengi
- Oksijen-Sarı, beyaz
- Azot-Kırmızı, sarı
- Hidrojen-Pembe
- Bakır-Yeşil
- Sodyum-Sarı
- Civa-Mavi, yeşil
- Hava-Kırmızımsı

Plazma, nötral atomlar ve moleküller, yükseltgenmiş ışıyan zerrecikler, yükseltgenmiş metastabil zerrecikler, elektronlar, nötral moleküler radikaller, iyonize moleküler parçalar ve yeni zerreciklerden oluşabilir. Bunlara ek olarak foton ışıması (görünür ve ultraviyole) oluşabilir. Bu zerreciklerin çoğu, kimyasal olarak, başlangıçtaki gaza göre reaktiftir. Oluşan her zerreciğin durumu birçok faktöre bağlıdır; plazma oluşumu, plazma gücü, plazmanın oluşum yeri ve gaz yoğunluğu.

İyonlar ve elektronlar, bir elektrik alana girdiklerinde hızlanırlar. Bu yüksek enerjili iyonlar, yük-değişim mekanizması ile yüklerini kaybederler. Yüksek enerjili iyonlar nötralden elektron alır ve düşük enerjili iyon ve yüksek enerjili nötral yaratır. Bu yüksek enerjili nötraller elektrik veya magnetik alandan etkilenmezler. Enerji taşıyan iyonlar ve nötraller gaz zerreciklerinin fiziksel olarak çarpışması sonucu enerjilerini yitirirler. Bu da gaz sıcaklığını artırır. Plazma oluşumu bölgesi dışında yüzeye yakın yerler hariç, plazma nötraldir. Bunun anlamı, her santimetrekare başına eşit sayıda elektron ve iyonu bünyesinde barındırmasıdır ve bu yoğunluğa “plazma yoğunluğu” adı verilir. Plazmada tane sıcaklığı 2-3 eV ’tan (soğuk plazma) binlerce eV ’a kadar (sıcak ve füzyon plazma) olabilir [22,30].

“Plazma” deyiimi, ilk defa 1928 yılında General Elektrik laboratuvarında çalışan Irving Lagmuir tarafından kullanılmıştır. Plazma, uzunca bir süre iyonize gaz olarak kabul edilmiştir. Bugün ise plazma, adi gazlardan üç yönden farklı olan maddenin 4. hali olarak kabul edilmektedir. Bu farklar sırasıyla;

- Plazma elektrik yüklü zerrecikler içerir.
- Plazmanın elektriksel özellikleri, adi gazlarınkinden farklıdır.
- Plazma anizotropiktir. Yani özellikler farklı doğrultularda farklıdır [21,25].

2.5.2. Plazma Püskürtme İle Kaplama Prosesinde Ön İşlemler

Kaplama kalitesinin iyileştirilmesi için, kaplama öncesi alt metal üzerinde gerçekleştirilecek yüzey işlemleri çok önemlidir. Alt malzeme yüzeyinin, yabancı maddelerden, çeşitli yağlardan ve kirliliklerden arındırılmış olması gerekir. Alt metal yüzeyinin pürüzlülüğü de kaplamanın yapışmasını etkileyen diğer önemli bir faktördür.

Kaplanacak yüzey, hazırlandıktan hemen sonra kaplanmalı, oksidasyon oluşumu engellenmelidir [22,31].

2.6.2.1. Temizleme Ve Yağ Alma

Püskürtme işleminden önce, yüzeydeki korozyon tabakası, pas, boya ve yağ temizlenmelidir. Yüzeydeki bu tabakalar; sıyrılarak, tel fırça ile fırçalanarak, makinede işlenerek, taşlanarak veya kimyasal işlemle uzaklaştırılabilir.

Yağ alma, kaplanacak yüzeyden sıvıların ve vücut yağ ve terinin sıyrılması için, en güvenli ve en ekonomik yöntemdir. Kaplamaya hazırlanmış yüzey, kaplama işi hemen başlamayacaksa temiz kraft kağıdı ile korunmalıdır. Kaplama ertesi güne yapılacaksa, kaplanacak yüzeyin mutlaka nemden ve yabancı maddelerden korunması gerekir. Bu arada, yüzeyde, yoğunlaşmalara sebep olacak kadar sıcaklık değişimleri de olmamalıdır.

2.6.2.2.Yüzey Pürüzlülüğü Oluşturma

Yağ alma işlemi bittikten sonra, yüzey pürüzlülüğünü optimum değerlere getirmek gerekir. Genelde bu işlem için 3 metod kullanılır. Bunlar kaba vida ve diş açma, kumlama ve bunların kombinasyonu ile oluşan üçüncü metoddur. İki metodda, yeterli verim alınamaması ve alt metalin çok yıpranması nedeniyle artık tek başına kullanılmamaktadır. Mekanik deformasyonun mümkün olmadığı yerlerde Ni-Al astarlar kullanılabilir. Ancak bunlar tek başına kumlamadan daha az bağlanma kuvveti gösterirler. Genelde kumlamadan sonra aradaki bağı kuvvetlendirmek için astarlama yapılır. Molibden de astar malzemesi olarak kullanılabilir. Özellikle metal-oksit kaplamalarda kullanılan bir yöntemdir.

Kaba vida diş açma;

Genelde silindirik yüzeye sahip kalın parçalara uygulanır. Hazırlanan parça tornaya alınır ve bir geçiş uygulanır. İnce yüzeyler için tavsiye edilmez. Bundan sonra yapılan kumlama ile daha yüksek bağ kuvvetleri elde edilir. Kesme sıvısının kullanıldığı durumlarda, yüzeyde bulunan sıvı kumlamadan veya kaplamadan önce mutlaka temizlenmelidir.

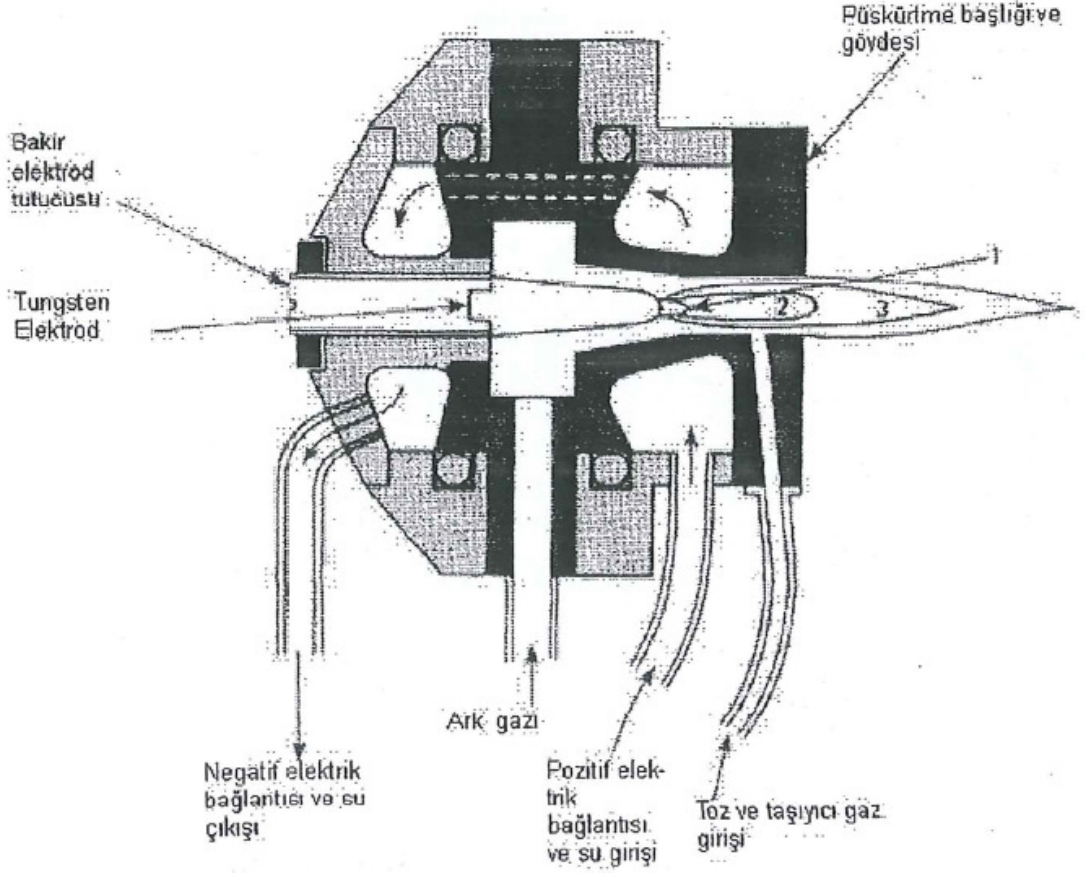
Kumlama;

Yüzeyi kirli alt malzemeler, kaplama hatalarına neden olurlar. Bu nedenle kaplama için kullanılan kumlama ekipmanları, asla; kir, boya ve sıvı ortamlar için kullanılmamalıdır. Kumlama için kullanılan hava, temiz ve kuru olmalıdır.

Alümina ve soğukta sertleştirilmiş çelik granüller (kum boyutunda), yüzey hazırlama için kullanılan malzemelerdir. Kum büyüklüğü -10 +30 mesh, -14 +40 mesh ve -30 +80 meshtir. Yüzey pürüzlülüğü kum partiküllerinin büyüklüğüne bağlı olduğundan, kum büyüklüğü istenen kaplama kalınlığına bağlı olarak belirlenir. Yüzey pürüzlülüğü aynı zamanda hava basıncı ile de değiştirilebilir. Kumlama yüzeyde bir basma gerilmesi oluşturur. İnce kesitlerde kumlama esnasında daha dikkatli olunmalıdır, çünkü taneler yüzey üzerinde bozulma yaratabilirler [22,32].

2.5.3. Plazma Püskürtme Kaplama

Plazma püskürtme, ısı püskürtme yöntemlerinin en güvenilir olanıdır. Kaplama malzemesi olarak kullanıldığından, birçok malzeme plazma püskürtme ile kaplanabilir. En önemli özelliklerinden biri, çok yüksek sıcaklıklara çıkıldığından, hemen hemen her cins toz malzemenin ergimesidir. Plazma tabancası; bir katot (elektrod), anot (püskürtücü) ve aralarındaki küçük bir odadan ibarettir. Doğru akım (DC) katoda bağlanır, ark ise anoda uygulanır. Aynı anda gaz veya gaz karışımı odalardan içeri verilir. Çok güçlü olan ark, gazı elektronlarına ayırır (iyonizasyon) ve plazma formu oluşmuş olur. Isıl enerji geri çekildiğinde kararlı olmayan plazma eski hali gaza dönüşür ve soğur. Burada bahsedilen sıcaklık 6600°C ile 16600°C arasında değişir. Şekil 2.6.'da plazma püskürtme prosesinde alevin farklı yerlerindeki sıcaklıklar şematize edilmiştir. Burada söz konusu olan sıcaklık, güneşin yüzey sıcaklığından yüksektir. Kaplama toz malzemesinin, gaza enjeksiyonu sırasında malzeme erir ve hedef alt malzemeye gönderilir. Burada toz malzemenin tabancaya enjeksiyonunu bir başka gaz sağlar. Argon gazı bu taşıma için idealdir [22,33].



Şekil 2.6: Yaklaşık plazma sıcaklıkları 1- 7800°C, 2- 10000-13400°C, 3- 7800-10000°C [22,33].

Püskürtme yapılmadan önce toz haznesi mutlaka temizlenmelidir. Bu temizleme işlemi genelde basınçlı hava ile gerçekleştirilir. Kritik öneme sahip parçalarda farklı toz hazneleri kullanılır. Böylece muhtemel kaplama hatalarından korunmuş olunur .

Tipik plazma gazları; hidrojen, azot, argon ve helyumdur. Bu gazlardan genellikle herhangi ikisi alınarak karışım yapılır ve elektroda uygulanan akımla beraber plazma sisteminin ürettiği enerjinin kontrolü gerçekleştirilir. Her gazın akış hızı ve uygulanan akım hesaplanır, tekrarlama işlemleri yapılır ve tahminlerde için içine katılarak kaplama gerçekleştirilir.

Burada plazma tabancası, bakır anot ve tungsten katottan oluşur ve her ikisi de su ile soğutulur. DC akımı elektrodunun soğutulmuş cidarları, plazmanın dış bölgelerinde plazma sıcaklığını düşürür. Soğuma iyonlaşmayı ve dolayısıyla dış bölgelerde gazın sıcaklığını düşürür. Soğuma dış bölgelerdeki gazların iletkenliğini azalttığından deşarj akım, plazmanın sıcak merkez bölgesinde yoğunlaşma eğiliminde olur. Bu da, ısı

büzme etkisi yaratarak daha yüksek bir sıcaklık ve iletkenlik oluşumunu sağlar. Merkezde deşarjın akım yoğunluğu belli bir düzeyi aşınca bir ikinci büzme etkisi işe karışır. Bu da, manyetik büzme olup, burada aynı yönde akan yüklü parçacıklar kendi kendine oluşan manyetik alan tarafından birbirlerini çekerler. Deşarjın bu sıkıştırması, plazmayı daha da yoğun hale getirir. Bundan sonra, hücrede oluşmuş elektromanyetik kuvvetler, yüksek basınç altında olan plazmayı, yüksek derecede uyarılmış ve çıplak gözle bakılamayacak parlaklıkta parçacıklardan oluşmuş bir uzun huzme halinde delikten dışarı fırlatır.

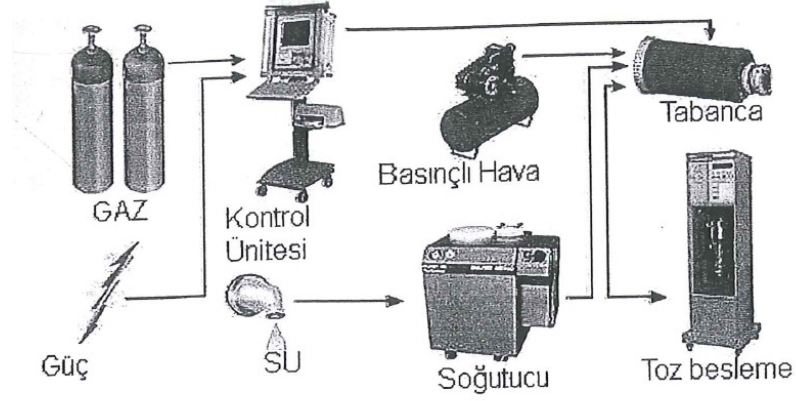
Plazma püskürtme prosesi esnasında, toz malzemenin bir kısmının ergidiği, bir kısmının ise yarı ergidiği görülmüştür. Bunun nedeni, arkın davranışdır. Ark dalgalanmalarının sebebi ise voltajdaki değişimlerdir.

Voltajdaki dalgalanma ne kadar az ise, elde edilen kaplama da o oranda iyi olur. Yapılan araştırmalar, eski aşınmış anotların dalgalanmaya sebep olduğunu, yeni anotun ise durgun voltajda çalıştığını göstermiştir. Buradan plazma püskürtmede anotun durumunun ne kadar kritik bir neme sahip olduğunu anlıyoruz.

Bir başka araştırmada plazma püskürtmede alev boyu ve genişliğinin, partikül özelliklerini ve kaplama kalitesini etkilediği anlaşılmıştır. Bu da aynı zamanda anodun aşınma durumu ile yakından ilgilidir. Yeni anotta alev uzun ve dardır. Bunun sonucunda elde edilen kaplama kalitesi iyidir. Eski, aşınmış anotta ise alev kısa ve geniştir. Bu durum anodun ömrünün bittiğini göstermekle beraber, bu anotla yapılan kaplamaların kalitesi düşüktür [22,33].

2.5.4. Plazma Püskürtme İle Kaplama Prosesinde Kullanılan Cihazlar

- Plazma tabancaları
- Plazma püskürtme kontrol üniteleri
- Toz besleme üniteleri
- Soğutucular



Şekil 2.7: Plazma püskürtme prosesinde yer alan cihazlar [22,33].

Plazma püskürtme işleminde her ne kadar cihazların kalitesi elde edilen kaplamanın kalitesine yoğun biçimde etkise de, en az bunun kadar önemli olan bir başka şey; cihazların birbirleriyle olan uyumları ve operatörlerin bu donanımları yeterince kullanım tecrübesidir [22,33].

2.5.5. Plazma Püskürtmede Kullanılan Gazlar

Plazma, yüklü parçacıklar içeren, elektrik iletkenliğine sahip gazdır. Gazın atomları yüksek enerji seviyelerine çıktığında, atomlar bir kısım elektronlarını bırakırlar ve iyonize olarak elektrik yüklü partiküller-iyonlar ve elektronlar içeren plazmayı oluştururlar.

Plazma püskürtmede plazmanın oluşumu genelde aşağıdaki gazların ve karışımlarının kullanılması ile oluşturulur;

- Argon
- Helyum
- Azot
- Hidrojen

Kullanılan gazların oluşturduğu sıcaklıklar 6600-16000°C arasında değişmektedir. Ancak yüksek sıcaklık her zaman yeteri kadar etkili olmaz. Önemli olan tozu plazma

formuna çıkarmaktır. Örneğin; 12000°C 'ye çıkartılmış ancak plazma formuna girmemiş He gazı, plazma püskürtme için yeterli enerjiyi sağlayamaz. Oysa 10000°C'ye çıkartılmış azot gazı plazma formuna ulaşmış olur ve He 'ye göre 6 kat fazla enerji üretir.

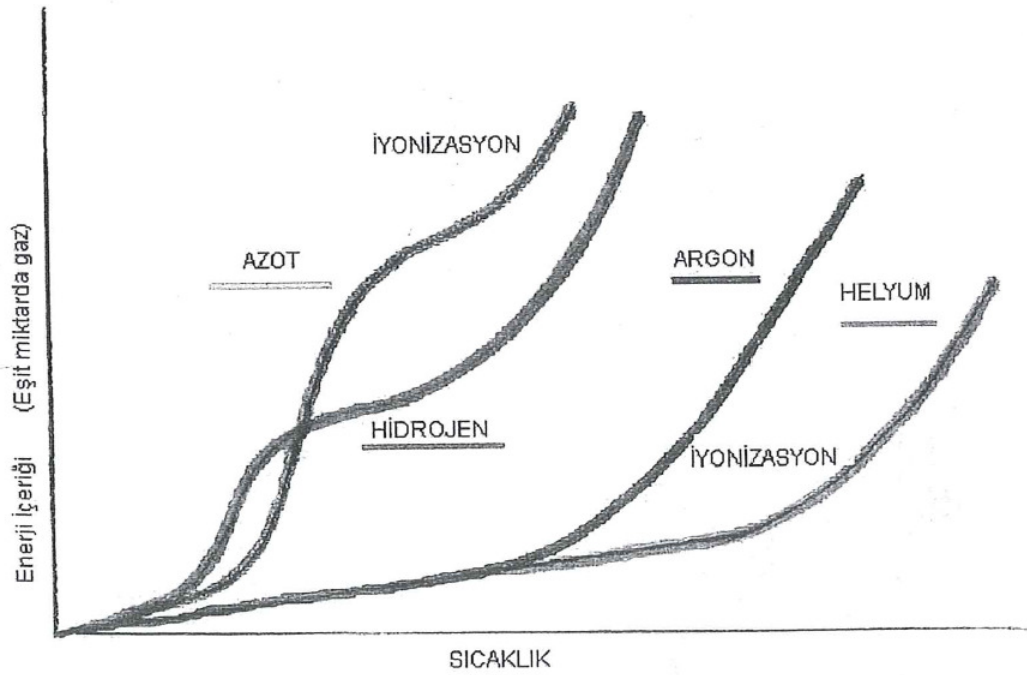
Azot ve hidrojen diatomik gazlardır. Bu plazmalar argon ve helyuma göre daha yüksek enerji içeriğine sahiptirler ve daha yüksek sıcaklıklara çıkarlar. Argon ve helyum ise monoatomik gazlardır (Atomları molekül oluşturmaz).

Azot; genel amaçlı birincil gaz olup kendi başına veya ikincil hidrojen ile birlikte kullanılır. Ayrıca en ucuz plazma gazıdır. Azot çoğu püskürtme malzemesiyle reaksiyona giremez. Ancak Ti gibi malzemelerle reaksiyona girebilir.

Argon; en çok tercih edilen plazma gazıdır ve enerjisini artırmak için ikincil gazlarla (hidrojen, helyum, azot) birlikte kullanılır. Argon en kolay plazma oluşturan gazdır ve elektrod ve başlığa karşı agresif değildir. Argon soygazdır ve tüm malzemelere karşı soydur.

Hidrojen; genelde ikincil gaz olarak kullanılır. Isı transfer özelliklerini anormal biçimde etkiler ve antioksidan olarak davranır. Çok az miktardaki H₂ diğer gazlara eklendiğinde plazma karakteristikleri ve enerji seviyeleri oldukça büyük değişiklik geçirir ve bu da plazma voltajının ve enerjisinin kontrolünü sağlamamıza yardımcı olur. %5-25 arasında birincil gaza karıştırılır. Ark voltajını yükseltir.

Helyum, argonla beraber ikincil gaz olarak kullanılır. Helyum soygazdır ve tüm püskürtme malzemelerine karşı soydur. Helyum, ısı transferi özelliklerini geliştirir ve plazma enerjisinin kontrolünde yüksek hassasiyet sağlar. Yüksek kaliteli karbür kaplamaların gerekli olduğu yerlerde yüksek hızlı plazma püskürtme uygulandığında helyum kullanılır. Şekil 2.8 'da çeşitli gazların sıcaklıkla bağlantılı enerji içerikleri gösterilmektedir [34].



Şekil 2.8: Çeşitli gazların sıcaklıkla bağlantılı enerji içerikleri [34].

2.5.6. Astarlanma

Astar malzemeleri, ara yüzeydeki bağlanmayı kolaylaştırmak, kaplamanın ısı şok dayanımını artırmak için kullanılır. Ni-Al, NiCrAlY, NiCoCrAlY sıkça kullanılan astar malzemeleridir. Bir araştırmaya göre astar tabakasının kalınlığı arttırıldığında ısı şok dayanımının arttığı görülmüştür. Farklı tür astarların kullanımı arayüzeydeki gerilmeleri farklı yönde etkiler [22,35].

2.5.7. Plazma Püskürtmede Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Plazma püskürtmede kaplama sonrası, kaplanan yüzeyde istenen sonuçlara ulaşmak için püskürtme mesafesi, yüzey hızı, ön ısıtma ve soğuma faktörlerine dikkat edilmesi gerekir.

2.5.7.1. Püskürtme Mesafesi

Tabancanın iş parçasına mesafesi önemli olup belli bir uygulamada sabit tutulması gerekir. Tabancanın iş parçasına mesafesi, iş parçası sıcaklığını etkiler. Bu nedenle

kaplama işlemi sırasında, tabanca-iş parçası mesafesi belirli bir mesafede (genelde 50-150 mm) sabit tutulmalıdır [21,22,28,31].

2.5.7.2. *Yüzey Hızı*

yana hareket hızı genelde her pasoda 0,25 mm'den fazla kaplama yapılmayacak şekilde tutulmalıdır. Ancak bu, parça şekline ve malzemeye bağlı olarak değişir [21,22,28,31].

2.5.7.3. *Ön Isıtma*

Birçok ana malzemeye, 90-150°C arası ön ısıtma yapılır. Bu, yüzey yoğunlaşmasının oluşumunu önler, alt tabakayı genişletir, soğuma sonrası gerilimleri azaltır. Ayrıca malzemedeki nemi de uzaklaştırır. Nemin uzaklaşması için alt malzemenin 38°C'ye ısıtılması yeterli olur [21,22,28,31].

2.5.7.4. *Soğuma*

Parçanın, kaplamanın ya da her ikisinin fazla ısınması fiziksel özelliklerde kayba yol açar. Bunun için soğutma gereklidir ve havada soğutma uygulanır. Hava temiz ve kuru olmalıdır. Soğutma yapılmadığı takdirde bağlantı zayıflar ve tabakanın ayrılmasına yol açabilir. Bu nedenle basınçlı hava kullanılır [22,36].

2.5.8. **Plazma Püskürtme Yönteminin Avantajları Ve Kullanım Yerleri**

1. Kaplama malzemesi ve alt malzeme birbirinden bağımsız olarak seçilebilmekte ve kombinasyonu sağlanabilmektedir. Plazma püskürtme kaplamaların bileşimi, dizaynı ve özellikleri çok geniş bir aralıkta değiştirilebilmektedir.
2. Kaplanacak malzemenin sıcaklığı, soğutma ile 200°C 'den daha düşük sıcaklıklarda tutulabilmektedir. Bu yolla çok çeşitli avantajlar sağlanır. Alüminyum, kalay, çinko alaşımları gibi düşük ergime dereceli alaşımlardan yapılmış parçaların kaplanması mümkündür. Alt malzemenin mikroyapısında değişiklik meydana gelmez.
3. Uygun kalınlıktaki bölgesel kaplamalar veya yüksek gerilime maruz alanlara uygulanabilmektedir.
4. Plazma püskürtme ile hem küçük hem de büyük parçalar kaplanabilmektedir.

5. Plazma püskürtme işlemi parça üretiminde imalat aşamaları arasına kolayca entegre olabilen bir yöntemdir [22,37].

Plazma püskürtme aşağıdaki alanlara uygulanabilir:

1. Uçak ve uzay sanayinde yüksek sıcaklık uygulamaları gerektiren yerlerde, türbin kanatlarında, roket gövdelerinde, patlama odasında, pervane platformlarında
2. Termik santrallerde, gaz ve dizel türbinlerde, dizel motorlarında
3. Kağıt endüstrisinde sürtünmeye ve aşınmaya maruz kalan hareketli makine elemanlarında
4. Tekstil endüstrisinde
5. Otomotiv sanayinde; piston başları, silindir kapakları, kompozit disk frenler, sübaplar ve ısıl izolasyon amacı ile
6. Bio-medikal uygulamalarında yapay kemik yapımında (hidroksiapatit, zirkonyumoksit kullanımı)
7. Elektrik santrallerinde yanma kamaraları ve ısıtıcı duvarlarında kullanılmaktadır [22,37].

2.5.9. Toza Bağlı Olarak Değişen Uygulama Alanları

Plazma püskürtme prosesinde kaplama malzemesi olarak çeşitli tozlar kullanılır. Bunun yanında astar olarak da yine toz malzemeler kullanılır. Bu toz malzemelerin her birinin farklı özellikleri vardır ve kaplama malzemesi olarak kullanıldığında ayrı sektörlerle hizmet edebilirler [22,38].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 NUMUNE HAZIRLAMA

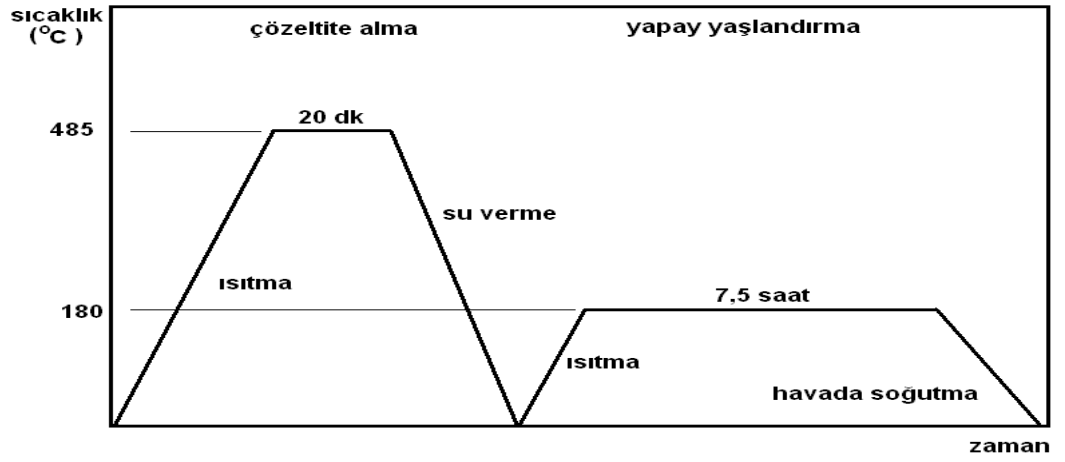
Alüminyum alaşımları, sünek yapılı olup talaş kaldırma kabiliyeti düşük metalik malzemelerdir. Bu zorluğu gidermek üzere uygun alaşım elemanları katılarak, çeşitli ısıt işlemlerle mukavemetlendirme çalışmaları yapılmaktadır.

Deneylerde kullanılan ve Tablo 3.1’de kimyasal yapısı verilen ülkemizin sınıflandırmasına göre Etial 60’a denk gelen 6063 alüminyum alaşımı, %0.40 Mg, 0.40 Si ve %0.10 Cu içeren yaşlandırma yapılabilen alüminyum alaşımıdır. Enjeksiyon presinde biyet yarı mamulü kullanılarak, Ø12 mm çubuk profili şeklinde basınçlı enjeksiyon pres dökümle üretilmiştir.

Sanayide bu şekilde üretilmiş olarak temin edilen 6063 alüminyum alaşımı profillerin sertliğini, mukavemetini ve talaşlı imalat kabiliyetini arttırmak üzere Şekil 3.1’de ifade edildiği gibi T6 yaşlandırma ısıt işlem rejimi uygulanmıştır. Buna göre Lenton UAF 15/10 model laboratuvar fırınında önce 480 °C’de 20 dakika tutularak çözeltiye alma işlemi tamamlanan alüminyum profiller, hızlı soğutmanın ardından bu defa 180 °C’de 7,5 saat bekletilip yaşlandırılarak çökelme sertleştirme işlemi tamamlanmıştır. 6063-T6 alüminyum alaşımı yarı profiller böylece yeterli sertliğe ulaştırılıp, talaşlı imalata hazır hale getirilmiştir.

Tablo 3.1: 6063 (Etial 60) alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri (ağ.%).

	Cu	Fe	Si	Zn	Mn	Mg	Ti	Cr
6063 (Etial 60)	0.10	0.30	0.40	0.10	0.20	0.40	0.10	0.05



Şekil 3.1: 6063 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma ısıtma işlemi (T6 ısıtma işlemi).



a) Aşınma testi numuneleri



b) Sürünme testi numuneleri

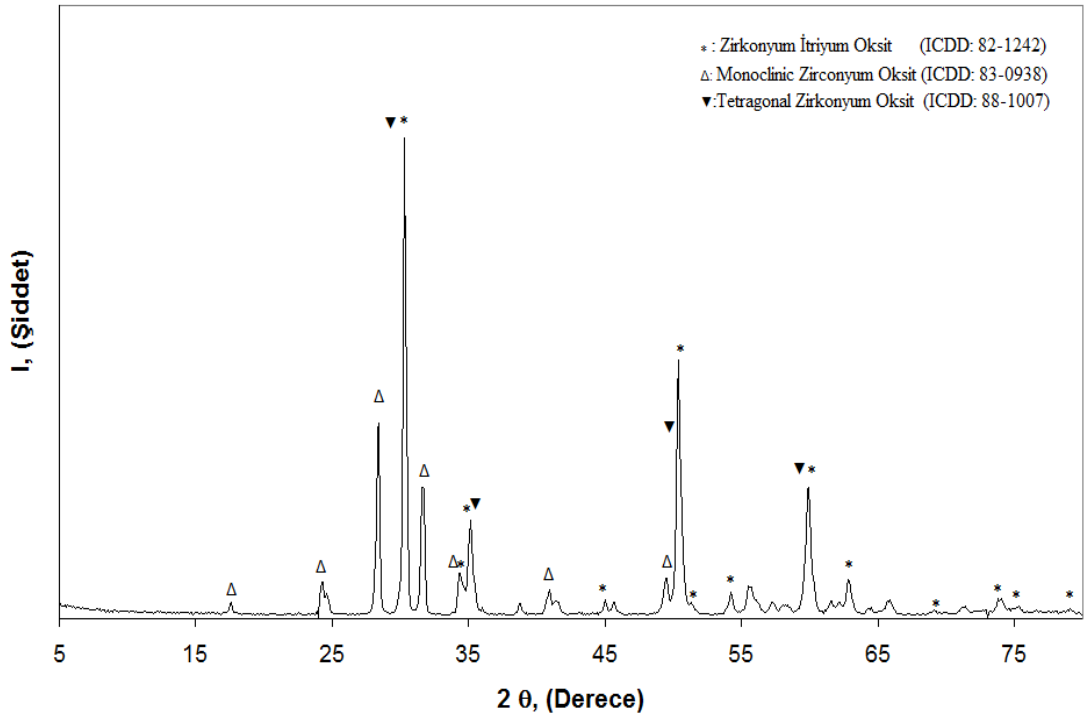


c) Çentikli darbe testi numuneleri

Şekil 3.2: Mekanik testler için hazırlanmış test numuneleri.

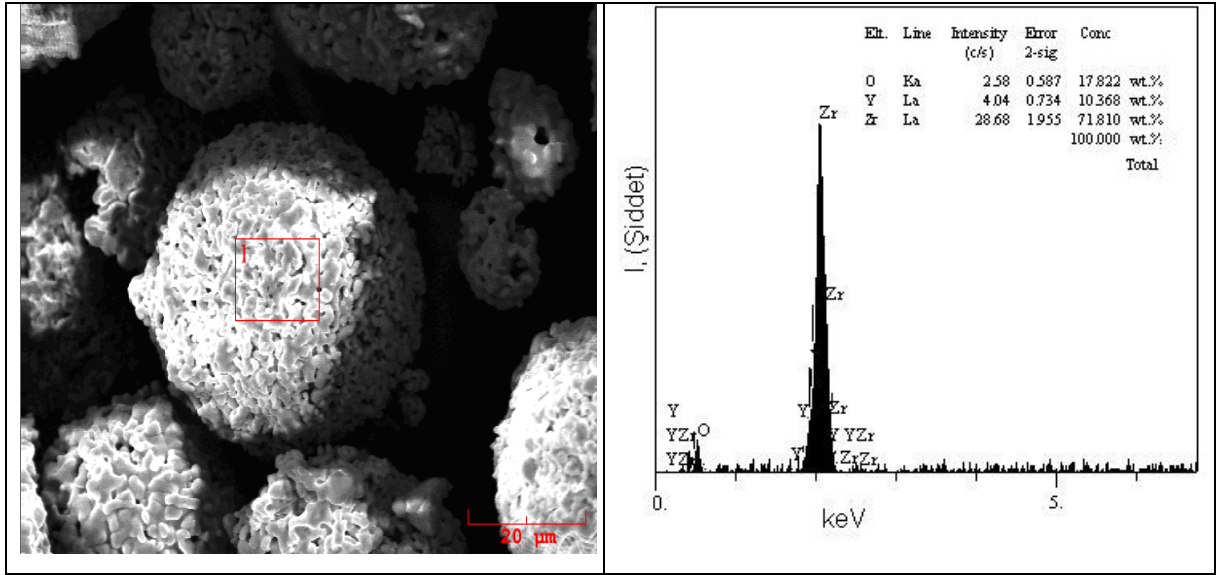
6063-T6 alüminyum alaşımı profiller, standart mekanik testlerde kullanılabilmesi için uygun standart numuneler haline getirilmek üzere CNC torna tezgahında talaş kaldırılarak işlenmiştir. Şekil 3.2 a, b ve c’de bu yolla elde edilmiş aşınma, sürünme, ve çentikli darbe testi numuneleri gösterilmiştir. Darbe testi numunelerine ait çentikler, alüminyum alaşımlarına özel yuvarlak tip çentiklidir ve özel makinesiyle bu çentikler açılmıştır.

Kaplama malzemesi olarak kullanılan Y-PSZ seramik tozu, PAC (Powder Alloy Corp.) ürünü Y_2O_3 ($YO_{1,5}$) ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya (ZrO_2) malzemesidir. Bu ürüne ait XRD analizi ve SEM/EDS analizleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3: Kaplama malzemesi olarak kullanılan Y-PSZ seramik tozun XRD diyagramı.

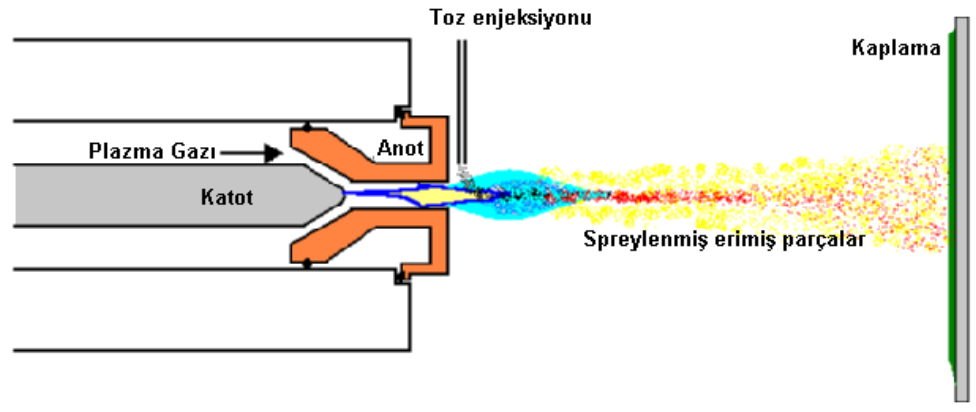
Şekil 3.4’teki EDS analizi sonuçlarıyla desteklenen Y-PSZ tanelerinin SEM görüntüsüne göre ortalama tane boyu $\sim 50 \mu m$ ’dir.



Şekil 3.4: Kaplama malzemesi olarak kullanılan Y-PSZ seramik tozun SEM ve EDS diyagramı.

3.2 PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE NUMUNE YÜZEYLERİNİN Y-PSZ İLE KAPLANMASI

Isıl püskürtme yöntemi olarak Şekil 3.5'te görülen plazma püskürtme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde tungsten katot ve su soğutmalı bakır anot arasında elektrik arki oluşturulur. Bu ark, soy gazı iyonize ederek plazma haline dönüştürür. Toz halindeki kaplama maddesi yüksek sıcaklıktaki ve yüksek hızdaki gaz plazmanın içerisine enjekte edilir. Böylece toz erir ve kaplanacak yüzeye yüksek bir hızla püskürtülür. Soy gaz olarak genellikle argon kullanılmakla birlikte gazın ısı özelliklerini artırmak için kimi zaman hidrojen, nitrojen ya da helyum ilave edilmektedir.



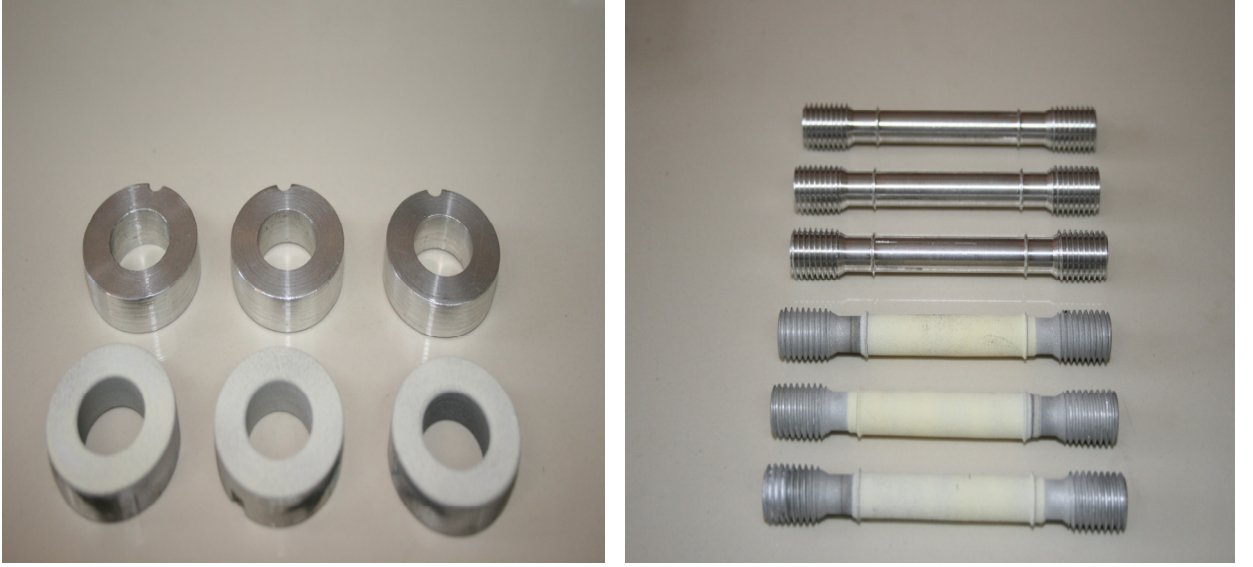
Şekil 3.5. Plazma püskürtme yönteminin şematik gösterimi

Gazın hızı tabanca dizaynına, toz miktarına ve akış hızına bağlıdır ve süpersonik olabilir. Plazmanın çekirdeğinde sıcaklık $>10.000^{\circ}\text{C}$ 'yi bulmaktadır. 6063-T6 numuneleri, önce kaplanacak malzemenin iyi yapışması için kumlama yapılarak yüzeyi pürüzlü hale getirilmiştir. Daha sonra kaplanacak metal yüzeyi ile seramik kaplama arasında iyi bağ kuracak ara katman astar malzemesi, Şekil 3.6 'da verilen Sulzer-Metco marka 3MB model plazma püskürtme tabancası ile metal yüzeyine dik yönde püskürtülerek ön kaplama yapılmıştır. Ara katman olarak astar malzemesi Metco ürünü Amdry 956 kodlu $\sim 45\mu\text{m}$ tane boyutuna sahip Ni-Al toz malzemesidir. Astar kaplamanın ardından nihai kaplama malzemesi olan Powder Alloy Corp ürünü $\sim 50\mu\text{m}$ tane boyutuna sahip ağırlık %8 yttria ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya tozları (Y-PSZ) yine aynı plazma püskürtme cihazı ile metal yüzeyine dik püskürtülerek 6063 altlık nihai olarak kaplanmıştır.



Şekil 3.6: Plazma püskürtme yönteminde kullanılan tabanca (3MB Sulzer Metco Plasma Flame Spray Gun).

Bu şekilde üretilmiş olan kaplanmamış ve Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımı ürünlere örnekler Şekil 3.7'de verilmiştir.



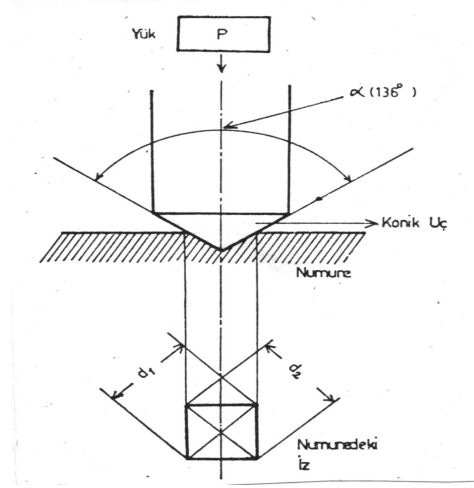
Şekil 3.7: Plazma püskürtme ile Y-PSZ kaplanmış ve kaplanmamış deney numune örnekleri.

3.3 Y-PSZ KAPLAMANIN KARAKTERİZASYONU

Yukarıda açıklandığı gibi ısıt püskürtmeyle itria ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya kaplanmış 6063 alüminyum alaşımının kaplama yapısının incelenmesi amacıyla metalografik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunun için elmas testere ile kesilmiş numune kesit yüzeyi 80-250 arası zımparalar kullanılarak zımparalanmış, ardından alümina solüsyonla parlatılarak, kesit yüzeyi incelenmek üzere ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra astarlama ve kaplamanın özelliklerini belirlemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Jeol 5600) ve Elektron Dağılım Spektrometresi (EDS, I-XRF) analizlerine tabi tutulmuş, böylece astarlama ve kaplamanın yapısına ilişkin incelemeler yapılmıştır.

3.4 MİKRO SERTLİK DENEYLERİ

Vickers sertlik deneyi, tabanı kare ve tepe açısı 136° olan standartlaştırılmış piramit şeklinde bir elmas ucun, değişken yükler altında numune yüzeyine batırılması sonucu bir iz oluşturmak esasına dayanır. Oluşan izin tabanı kare olan bir piramittir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Vickers ucunun numune üzerine bıraktığı iz ve köşegenlerin gösterimi.

$$\text{Vickers Sertlik Değeri (VSD)} = 2P \sin(a/2)/d^2 = 1.854F/d^2 \quad (3.1)$$

formülüyle hesaplanır.

F, deney yükü (kg), d, iz köşegenlerinin ortalaması (mm), a, tepe açısı =136.5°

Numunelerin Vickers sertlik ölçme deneyleri, ZWICK/ROELL Marka ZHU 8187.5 LKV model cihaz ile gerçekleştirilmiştir ve ölçümlerde her numunenin standartlara uygun olarak seçilmiş 5 ayrı yerinde ölçümler yapılarak, ortalama değerleri alınmıştır.

3.5 DARBE MUKAVEMETİ DENEYLERİ

Darbe deneyi, malzemenin ani dinamik bir zorlama altında kırılması için gerekli enerji miktarını belirler. Bulunan değer malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır.

Bu deneyde Şekil 3.9'da şematik olarak gösterilen sarkaç tipi cihazlardan faydalanılır. Ağırlığı G olan sarkaç, h yüksekliğine çıkarılır. Bu durumda potansiyel enerjisi Gxh olur. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında düşey bir düzlem içinde hareket ederek numuneyi kırar ve aksi yönde h_1 yüksekliğine kadar çıkar. Böylece numunenin kırılmasından sonra sarkacın potansiyel enerjisi Gxh_1 olur. Buna göre sarkacın başlangıçtaki potansiyel enerjisi ile numune kırıldıktan sonraki potansiyel enerjilerinin

farkı numuneyi kırmak için harcanmış, başka bir deyişle bu potansiyel enerji farkı kırılma anında numune tarafından absorbe edilmiştir.

Numunenin kırılma anında absorbe ettiği enerji şu şekilde gösterilebilir:

$$\text{Kırılma Enerjisi} = G.(h - h_1) = G.L.(\cos b - \cos a) \quad (3.2)$$

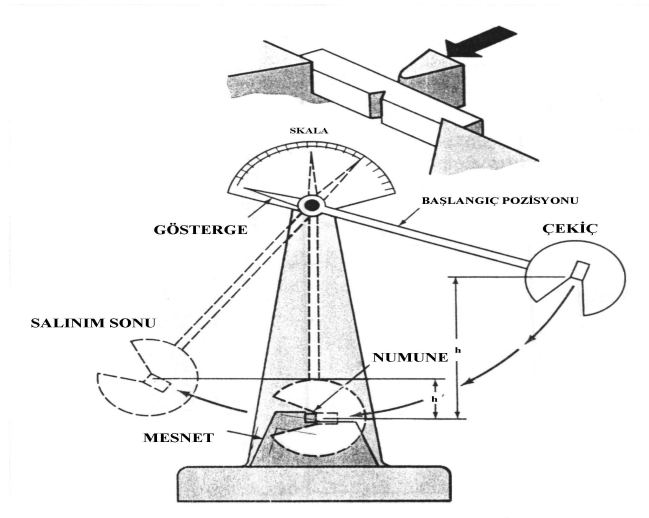
G : sarkacın ağırlığı (kg) ,

L : sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine olan uzaklığı (m) ,

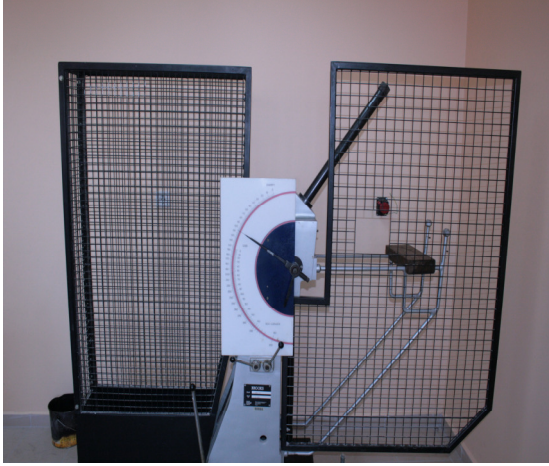
h : sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m) ,

h_1 : sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m) ,

a : düşme açısı, b : yükseliş açısı.



Şekil 3.9: Charpy darbe deneyi cihazının çalışma prensibi.



Şekil 3.10a : Darbe deneyi cihazı.



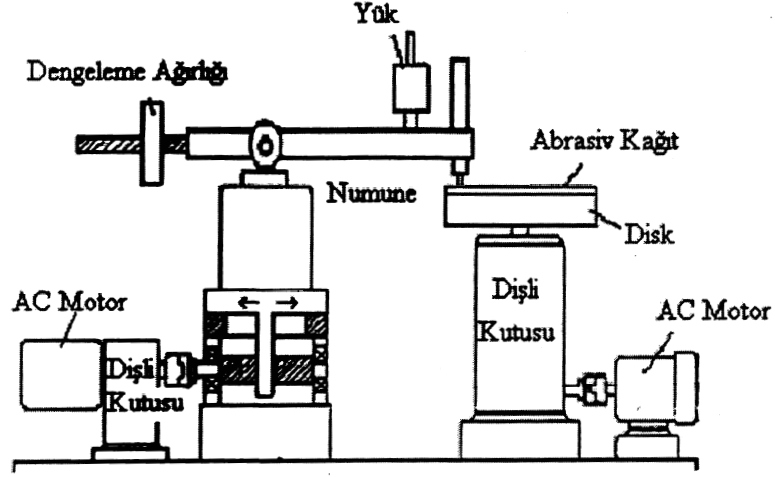
Şekil 3.10b: Darbe deneyi numuneleri.

Charpy darbe deneyi, yatay ve basit kiriş halinde iki mesnede yaslanan bir numunenin, çentik tabanına bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunelerin kırılması için gerekli enerjiyi belirleme işlemidir.

Bu çalışmada; BROOKS marka MAT21 model çentikli darbe test cihazı kullanılmıştır. (Şekil 3.10a). Kullanılan numuneler, 10x10 mm kare kesitli çubuk profilden kesilerek hazırlanmış ve 55 mm boyundadır. Numunelerin ortasına, çentik açma makinası kullanılarak Şekil 3.10b’de görüldüğü gibi 45 derecelik açı ve 2 mm derinlikte çentik açılmıştır.

3.6 ABRASİF AŞINMA DENEYLERİ

Deneyler, Şekil 3.11’de şematik olarak verilen “Pin-on-Disc” tip olarak adlandırılan yöntemle göre ve ağırlık kaybına dayalı olarak yapılmıştır. Cihaz; numunenin bağlı bulunduğu kol, bu kolu dengede tutan dengeleme ağırlığı, aşındırıcıyı taşıyan disk, bu diskin bağlı olduğu dişli kutusu, diski ve taşıyıcı kolu çalıştıran motor kısımlarından meydana gelmektedir.



Şekil 3.11: “Pin on Disc” tipi aşınma testinin şematik görünüşü [12]

Aşınma deneylerinde ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyoizotop gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dâhilinde bulunması sebebiyle uygulanan deneylerde ağırlık kaybına bağlı sistem kullanılmıştır. Ağırlık kaybının belirlenmesi için $\pm 0,0001$ hassasiyetinde bir terazi yardımıyla yapılmıştır. Ağırlık kaybı metodunda aşınma deneylerinden önce ve sonra nemi alınmış her numunenin ağırlığı hassas terazilerde ölçülür. Numunelerin ağırlık kayıpları (ΔG) ve yoğunlukları (ρ) kullanılarak;

$$\Delta V = \Delta G / \rho \quad (3.3)$$

Hacimsel kayıp hesaplanır. Burada;

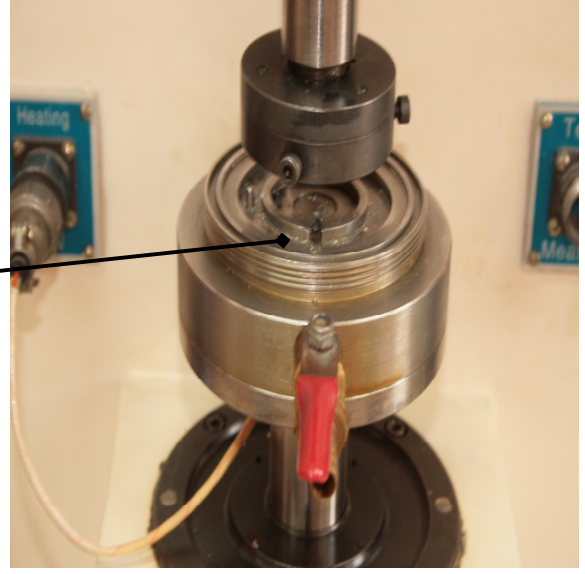
ΔV : Hacimsel kayıp (cm^3),

ΔG : Ağırlık kaybı (g),

ρ : Yoğunluk (g/cm^3)

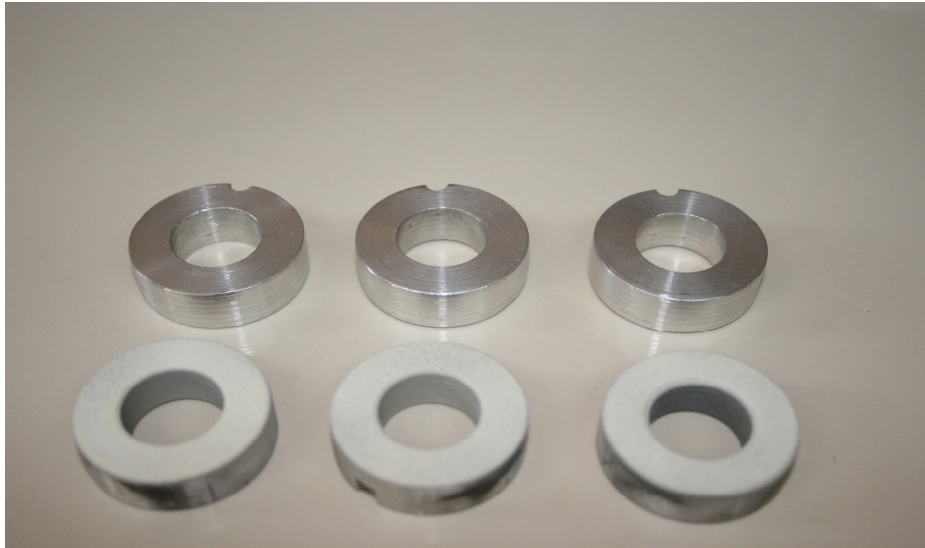


Şekil 3.12a: Aşınma testi cihazı.



Şekil 3.12b: Pin ve numune yerleştirme kafası.

Çalışmada bilgisayar kontrollü ve özel yazılıma sahip Jinan marka MMW-1A model aşınma testi cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.12a). Aşındırıcı “pin” olarak saf alümina (korund) pinlerin bağlandığı üst kafa ve numunenin yerleştiği alt kafa detayları ise Şekil 3.12b’de görülmektedir.

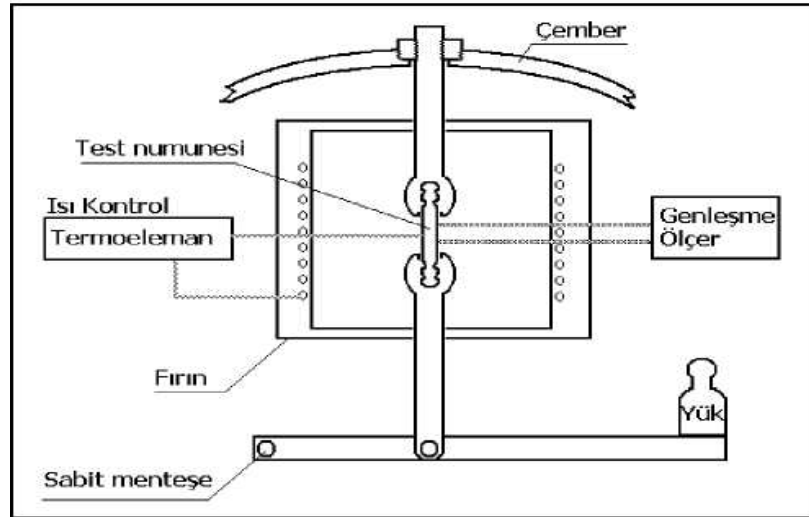


Şekil 3.13 : Kaplanmamış ve Y-PSZ kaplanmış 6063 alüminyum aşınma testi numuneleri.

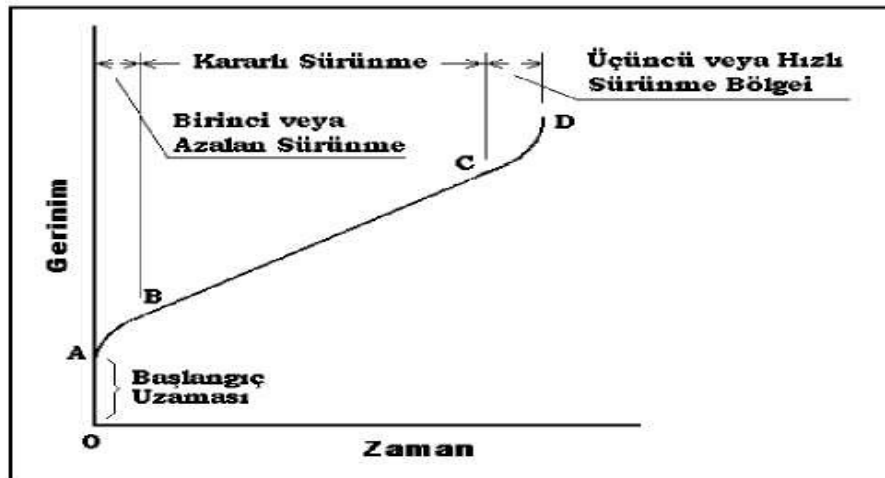
Plazma püskürtme ile kaplanmamış ve kaplanmış 6063 alaşımından CNC tezgâhta işlenerek hazırlanmış abrasif aşınma testi numunelerinin bir kısmı Şekil 3.13’de verilmiştir.

3.7 SÜRÜNME DENEYLERİ

Sabit bir sıcaklık ve basınç altında zamana bağlı olarak malzemede meydana gelen deformasyon olayına *sürünme* (*creep*) denir. Şekil 3.14’te sürünme testinin cihazı ve prensibi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.14: Sürünme test cihazının çalışma prensibinin şematik görünümü.



Şekil 3.15: Tipik Sürünme Eğrisi.

Sürünme deneyi sırasında, deformasyon oranı, zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülür ve Şekil 15'deki gibi bir sürünme eğrisi elde edilir. Şekilden de görüldüğü gibi sürünme primer (birincil), sekonder (kararlı sürünme) ve tersiyer (üçüncül) bölgeler olmak üzere üç bölgeye ayrılır. Sürünmenin ilk aşamasında dislokasyonlar hızla tırmanışa geçer, böylece hızlı bir deformasyon yaşanır. Daha sonra dislokasyonların akış hızı düzensizlikler tarafından engellenmesiyle yavaşlar. İkinci ve kararlı sürünme bölgesinde, deformasyon hızı sabitleşir. Sürünme eğrisinin kararlı kısmının eğimi minimum sürünme hızını ($\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$) verir. Birinci ve üçüncü bölge sürünme sonucu deformasyon hızlarının yüksek olması nedeniyle ikinci bölge mühendislik tasarımlarında daha çok dikkate alınmaktadır. Sürünmedeki toplam deformasyon miktarı (ϵ), zamana (t), sıcaklığa (T) ve gerilmeye (σ) bağlıdır. Bir başka ifadeyle $\dot{\epsilon} = f(\epsilon, t, \sigma, T)$ 'dur.

3.7.1 Sürünme Mekanizmaları Ve Kararlı Sürünme Bölgesinde Geçerli Kanunlar

3.7.1.1. Gerilmenin Etkin Olduğu Durum

Gerilmenin kontrolünde gelişen bu sistemde dislokasyonlar, tane sınırlarında yığılırlar. Dislokasyonların yığılması, kayma hareketlerini ve şekil değiştirmeyi duraksatmaktadır. Böylece tane sınırlarında gerilme giderek yükselir ve giderek çatlaklar oluşturur. Sonunda oluşan çatlaklar büyüyerek malzemenin kopmasına neden olur. Gerilmenin etkisinde gelişen bu olaya *Dislokasyon Sürünmesi* denir.

3.7.1.2. Sıcaklığın Etkin Olduğu Durum

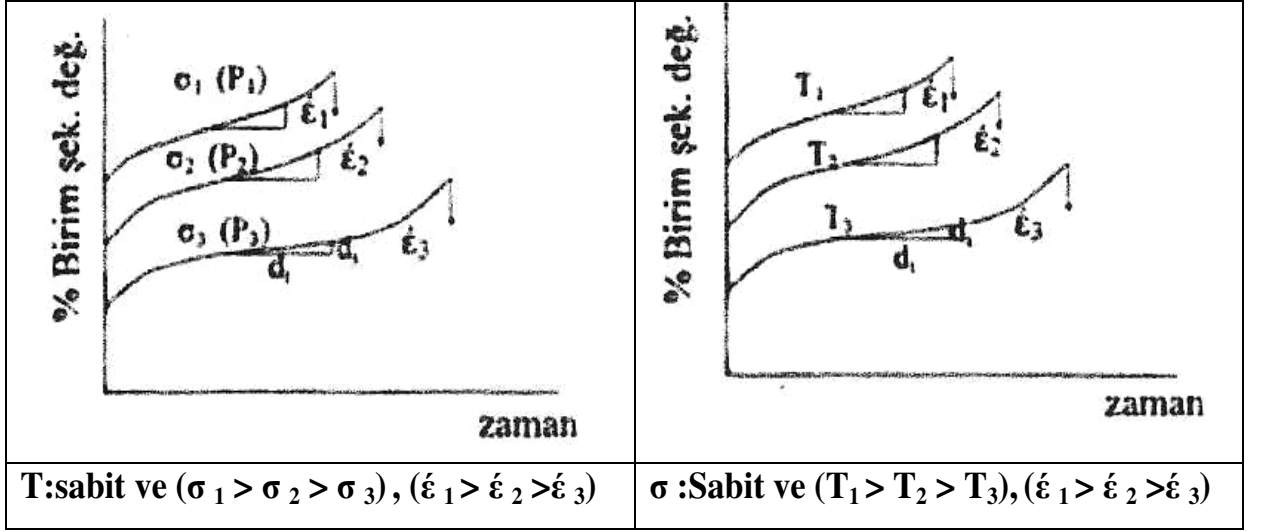
Difüzyon Sürünmesi olarak da ifade edilen bu mekanizmaya göre sürünme mekanizması sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın etkinliği, difüzyona (yayınmaya) olanak tanır ve sıcaklık arttıkça difüzyon hızı da artar. Tane sınırları, dislokasyonların kesişme noktasıdır ve atomların dizilişleri bakımından zayıftır. Sıcaklığın etkisiyle difüzyonu sağlayacak kadar enerji verildiğinde, tane sınırlarındaki atomlar, tane içlerine doğru yayınmaya başlar ve sonuçta tane sınırları iyice zayıflar. Sürünme nedeniyle uygulanan gerilmenin etkisiyle tane sınırlarında uzamalar olur. Bu şekilde sıcaklığa bağlı olarak gelişen sürünmeye *Difüzyon Sürünmesi* denir.

3.7.1.3. Gerilme Ve Sıcaklığın Etkin Olduğu Durum :

Gerek gerilmenin, gerekse de sıcaklığın etkisiyle meydana gelen sürünme ise aşağıda verilen Arrhenius bağıntısıyla ifade edilen *Üssel Sürünme Kanunu (Power Law Creep)* ile tanımlanabilmektedir:

$$d\epsilon/dt = \dot{\epsilon} = A_0 \cdot \sigma_{uyg}^n \cdot e^{-(Q/RT_{uyg})} \quad (3.4)$$

$\dot{\epsilon}$: Sürünme hızı, A_0 : Sabit, σ_{uyg} : Uygulanan gerilme ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ vb.), n : Gerilme faktörü, R : Gaz sabiti, T_{uyg} : Uygulanan Sıcaklık (T_1, T_2, T_3 vb.), Q : Aktivasyon enerjisi.

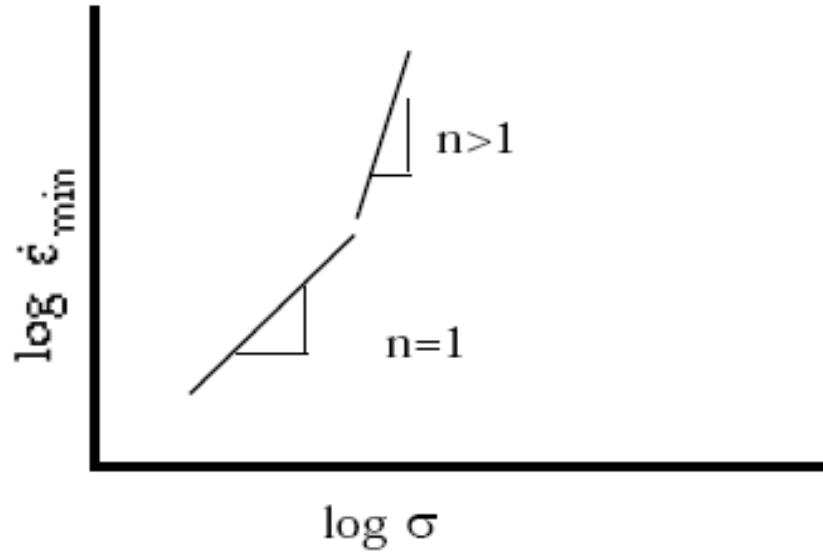


Şekil 3.16: a. Sabit sıcaklık ve farklı gerilmelere bağlı, b. Sabit gerilme ve farklı sıcaklıklara bağlı elde edilmiş sürünme eğrilerinin şematik gösterimi.

Şekil 3.16'da gösterildiği gibi sıcaklığa bağlı ve gerilmeye bağlı sürünme testleri ile bir seri veri oluşturularak, bunları Arrhenius bağıntısı ile değerlendirmek mümkündür. Böylece sürünme hızı ile gerilme ve sıcaklık arasında ilişkiler kurulabilmektedir.

Buna göre sabit bir T_1 sıcaklığında farklı uygulama gerilmeleri ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) altında farklı sürünme deneyleri yapılarak elde edilen veriler Arrhenius Denklemine uyarlanarak $\ln \dot{\epsilon}_{min.} - \ln \sigma_{uyg}$ arasında Şekil 3.17'de verilen grafik çizilir.

$$\ln \dot{\epsilon}_{min.} = [\ln A_0 - Q/RT_{sbt}] + n \ln \sigma_{uyg} \quad (3.5)$$

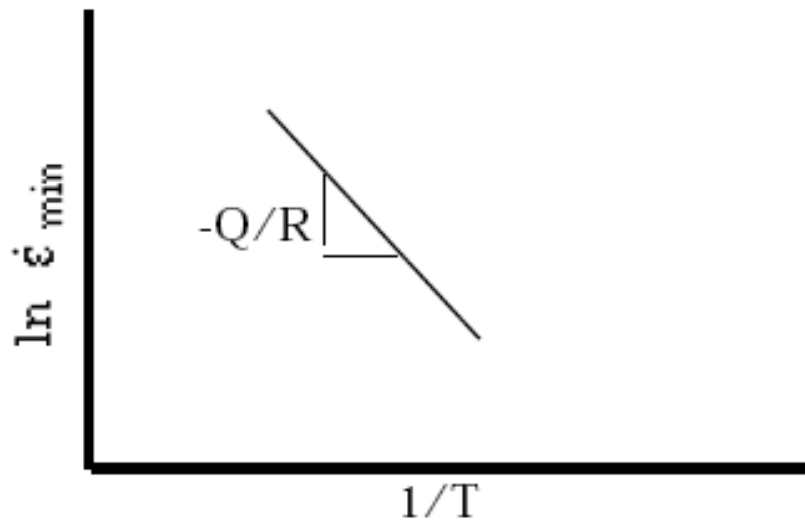


Şekil 3.17: Gerilmeye bağlı faktörün (n) belirlenmesinin şematik gösterimi.

Grafikten elde edilen doğrunun eğimi hesaplanarak, n (gerilme faktörü) değeri bulunur.

Gerilme faktörü (n) belirlendikten sonra aynı yolla bu defa sabit bir σ_1 gerilmesi altında farklı sıcaklıklarda (T_1, T_2, T_3) elde edilen farklı sürünme deneyleri yapılır. $\ln \dot{\epsilon}_{min.} - 1/T_{uyg}$ arasında Şekil 3.18’de verilen grafik çizilerek, elde edilen doğrunun eğiminden Q (aktivasyon enerjisi) hesaplanır.

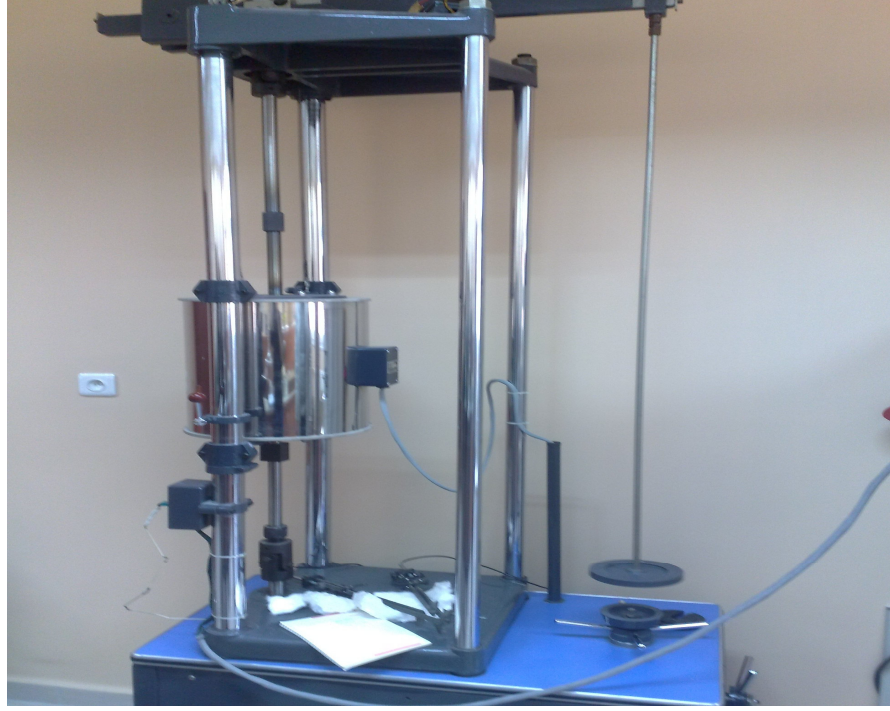
$$\ln \dot{\epsilon}_{min.} = [\ln A_0 + n \ln \sigma_{sbt}] - Q/RT_{uyg} \quad (3.6)$$



Şekil 3.18: Sıcaklığa bağlı aktivasyon enerjisinin (Q) belirlenmesinin şematik gösterimi.

3.7.2 Sürünme Deneylerinin Yapılışı Ve Analitik Değerlendirmeler

Bu tez çalışmasının sürünme deneylerinde Şekil 3.19’da görülen MAYES marka TC-30 model sürünme testi cihazı kullanılmıştır.

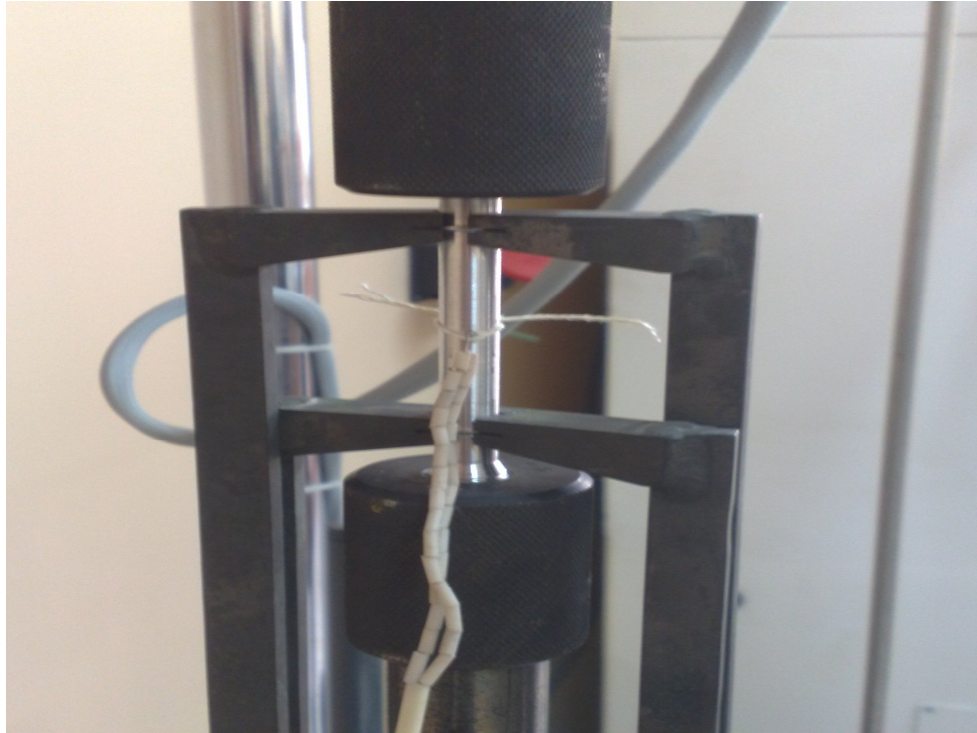


Şekil 3.19: Sürünme cihazının genel görünümü.

Sıcaklık ölçümleri K-tipi termal element çifti ile yapılmış ve sıcaklık değerleri numune üzerindeki sıcaklık değerleri olacak şekilde konumlandırılmıştır. Sürünme deneyinin standardına uygun olarak Y-PSZ ile kaplanmış ve kaplanmamış 6063 alaşımından numuneler Şekil 3.20’de verilmiştir. Şekil 3.21’de ise numunenin cihaza ve termal element çiftinin de numuneye bağlanma şekli görülmektedir.



Şekil 3.20: Sürünme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmış kaplanmamış ve Y-PSZ ile kaplanmış 6063 alüminyum numuneler.



Şekil 3.21: Numunenin ekstansometreye ve termal element çiftinin numuneye bağlanması.

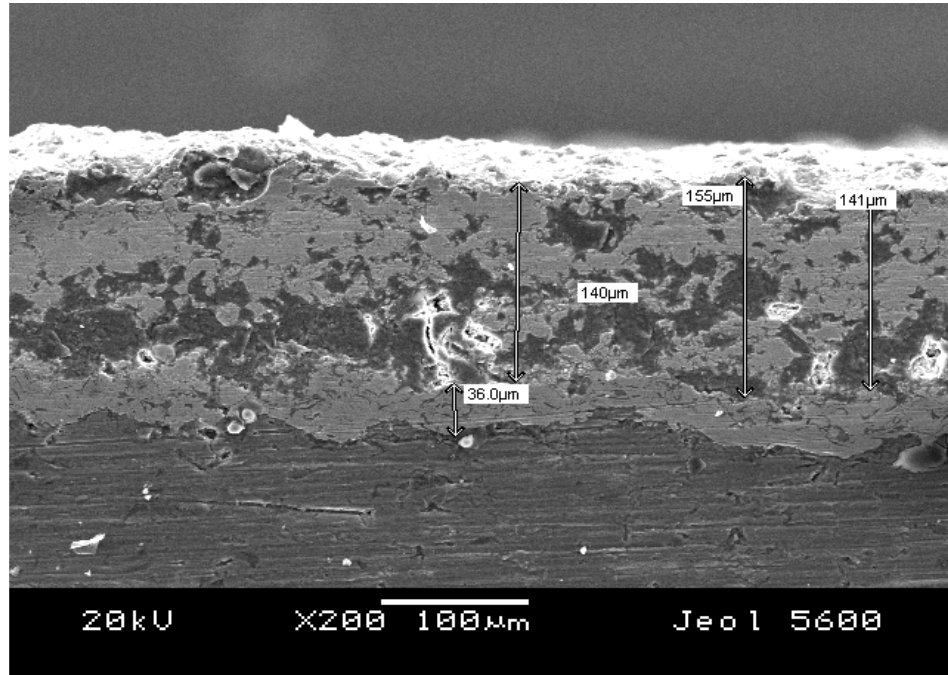
Sıcaklığa bağlı sürünme özelliklerinin incelenebilmesi için; σ_1-T_1 , σ_1-T_2 , σ_1-T_3 ($T_1>T_2>T_3$ ve gerilme sabit) ve gerilmeye bağlı sürünme özelliklerinin incelenebilmesi için ise; σ_1-T_1 , σ_2-T_1 ve σ_3-T_1 ($\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$ ve sıcaklık sabit) setlerine uygun olarak sürünme deneyleri yapılmıştır. **Kaplanmamış** ve **Y-PSZ** ile **kaplanmış** olan 6063 alaşımı numunelere ayrı ayrı uygulanmak üzere –deneme testleri ve hatalı sonuçlananlar hariç- 10 farklı sürünme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bunların sonucunda Gerilme faktörü (n) ve Aktivasyon enerjisi (Q) değerleri hesaplanmıştır.

4. BULGULAR

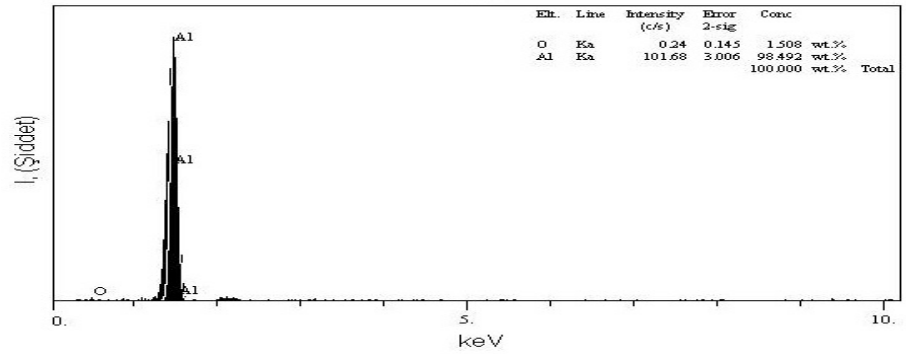
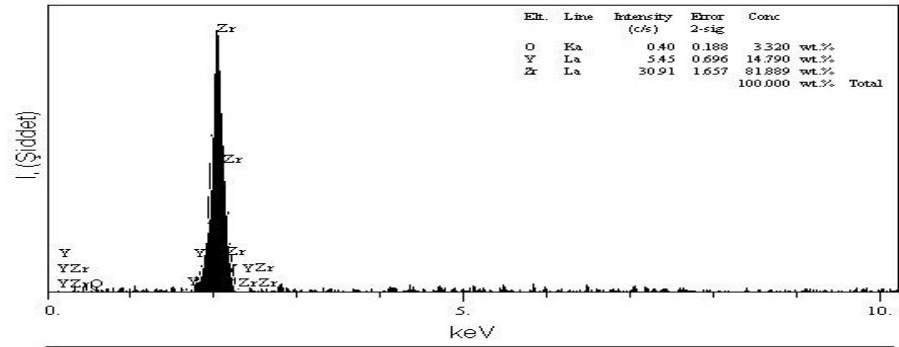
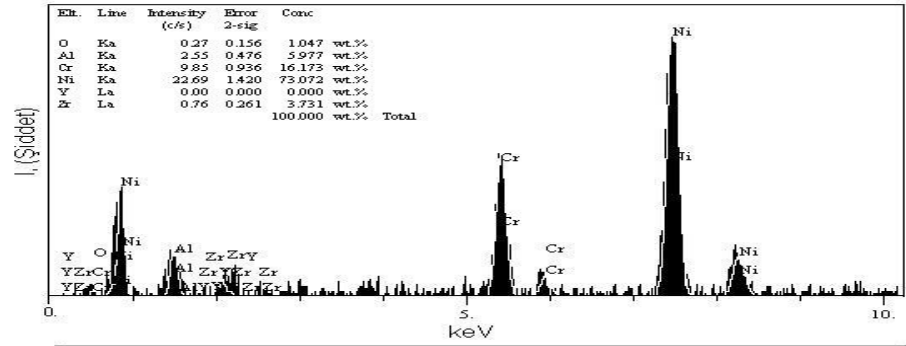
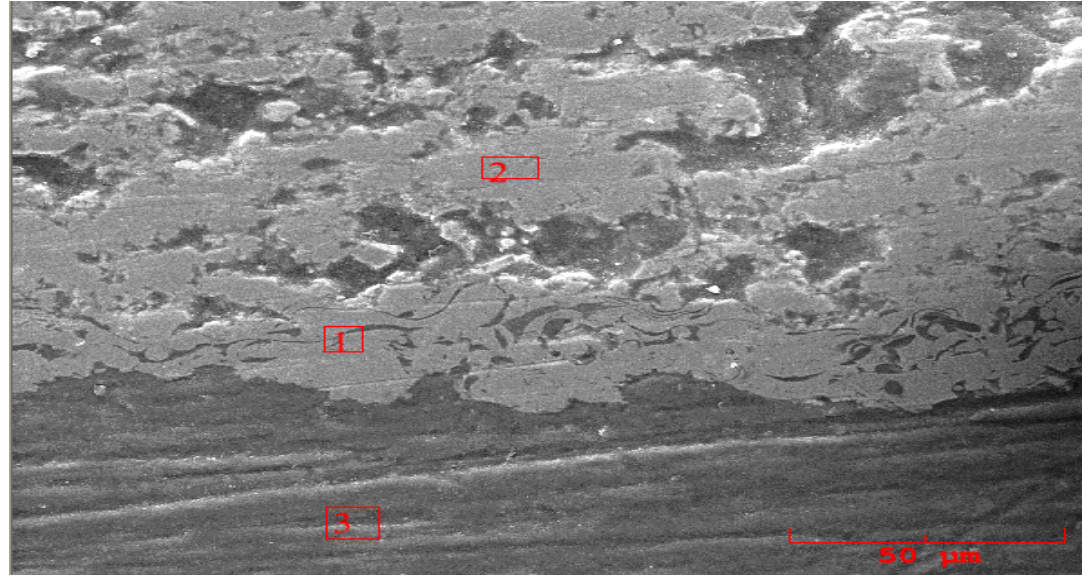
4.1 KAPLAMANIN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

6063 altlık üzerine kaplanmış astar ve zirkonyanın kesitinden alınan SEM mikro fotoğrafında kaplamadaki katmanlar ve kaplamaların kalınlıkları, Şekil 4.1’de verilmiştir. Buna göre; ısıt püskürtme ile elde edilmiş astar (ara katman) kalınlığı $\sim 36\mu\text{m}$ ve Y-PSZ kalınlığının ise $\sim 140\text{-}155\mu\text{m}$ arasında değiştiği görülmektedir.

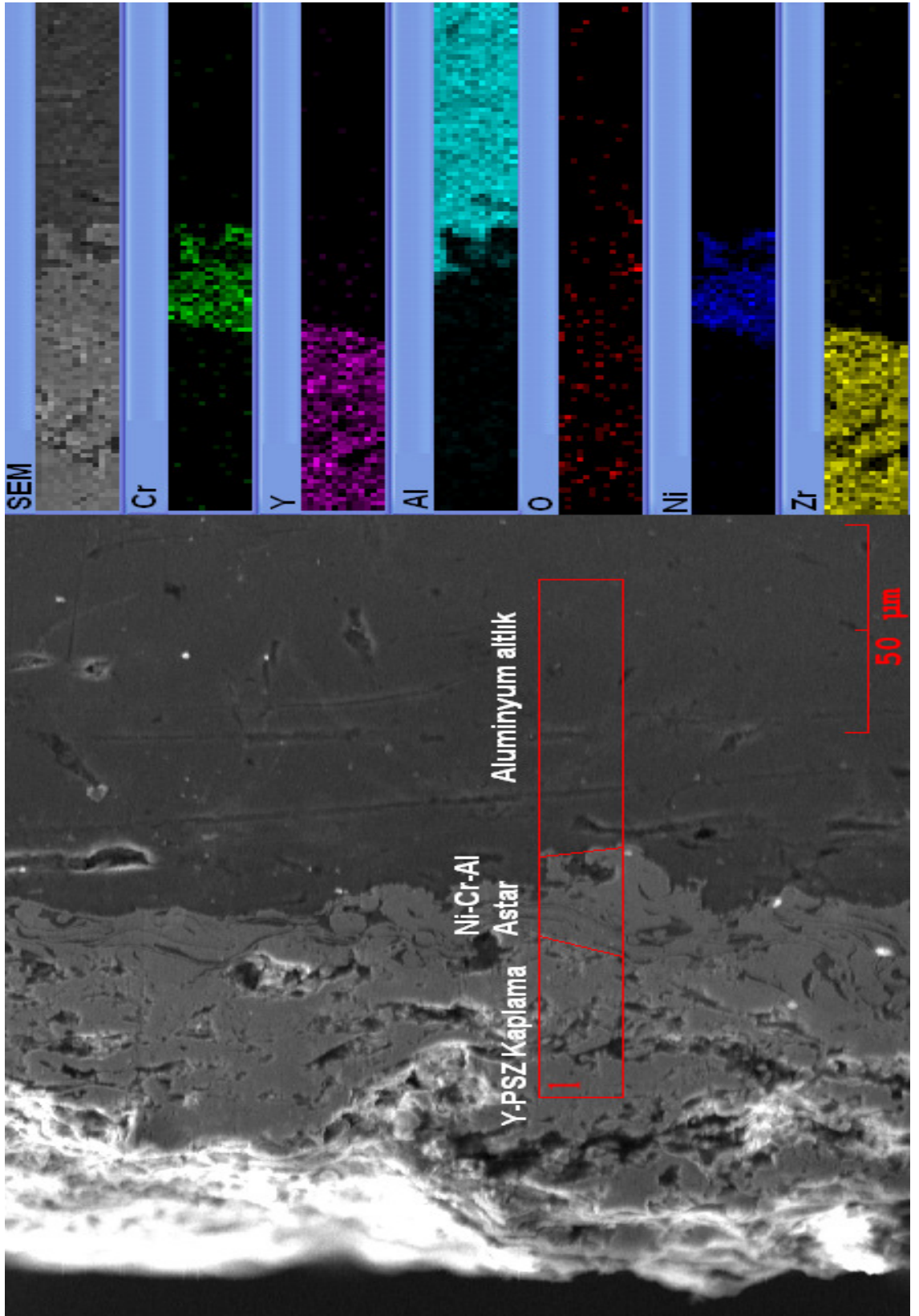
Bölüm 3.3’de açıklandığı gibi gerçekleştirilen SEM/EDS karakterizasyon çalışmaları sonucunda Şekil 4.2 ve 4.3 ün incelendiğinde kaplama (Y-PSZ), ara katman (astar, Ni5Al) ile 6063 alaşımından oluşan tabakalı yapı ve bileşimi tespit edilmiştir. Kaplamanın dış yüzeyi pürüzlü olup, kesitten incelendiği kadarıyla $\sim 25\mu\text{m}$ boyutunda gözeneklilik göze çarpmaktadır. Bu gözenekli yapı, hafif olmasıyla değerli olan alüminyum alaşımının yoğunluğunun düşük kalmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.1: Kaplamadaki katmanların; astarın ve kaplamanın kalınlıkları.



Şekil 4.2: Kaplama (Y-PSZ), ara katman (astar, Ni-Cr-Al) ile 6063 altlıktan oluşan kompozit yapı.



Şekil 4.3: Altlık, astar malzemesi ve kaplamanın birbirinden ayrımının belirlenmesi için uygulanan SEM-EDS Mapping çalışması.

Şekil 4.3 incelendiğinde beklentilere uygun olarak; kaplama bölgesinde Y ve Zr elementlerinin dağılımı, astar bölgesinde Ni ve Cr elementlerinin dağılımı ile altlık bölgesinde Al elementinin dağılımı net olarak görülmektedir.

4.2 SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI

Vickers sertlik deneyleri, 3 kgf yük uygulanarak zirkonya kaplanmış ve kaplanmamış 6063 alaşımının yüzeyleri üzerine dik yönde Bölüm 3.4’de açıklanan standartlarına uygun olarak seçilen beş farklı noktaya indentasyon yapılarak elde edilmiştir. Buna göre yapılan denemeler sonucunda kaplanmamış numunelerden elde edilen ortalama değer **80 HV3** mertebesindeyken, Y-PSZ kaplanmış numunelerden alınan ortalama sonuç ise **266 HV3** olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi zirkonya kaplanmış numunelerin sertliği, kaplanmamış çıplak numunelere göre 3 kattan daha fazladır.

Bunun dışında Şekil 4.2 de görülen kesi yüzeyine dik yönde ve 1, 2, 3 nolu bölgelere uygulanan vickers mikrosertlik testi sonuçlarının ortalamaları; 1. Bölge için (astar bölgesi) **173 HV100**; 2. Bölge için (Y-PSZ bölgesi) **818 HV100**, 3. Bölge için (6063 Al altlık) **60 HV100** olarak bulunmuştur.

4.3 DARBE DENEYİ SONUÇLARI

Denemelerde numunelere charpy darbe deneyi uygulanarak kaplanmış ve Y-PSZ kaplanmamış 6063 alaşımlarının darbe mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerden beşer adet deney sonucu elde edilecek şekilde denemeler yapılmıştır. Sonuçlar 5 farklı denemenin ortalaması şeklindedir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre kaplanmamış numunelerin darbe dirençleri **50,4 Joule** olarak bulunmuşken, kaplanmış numunelerin darbe dirençleri ise **103 Joule** olarak ölçülmüştür.

4.4 AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI

Aşınma deneyleri ile kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin aşınma dirençleri belirlenerek karşılaştırılmıştır. Aşınma deneylerinde yük, aşınma mesafesi ve hız

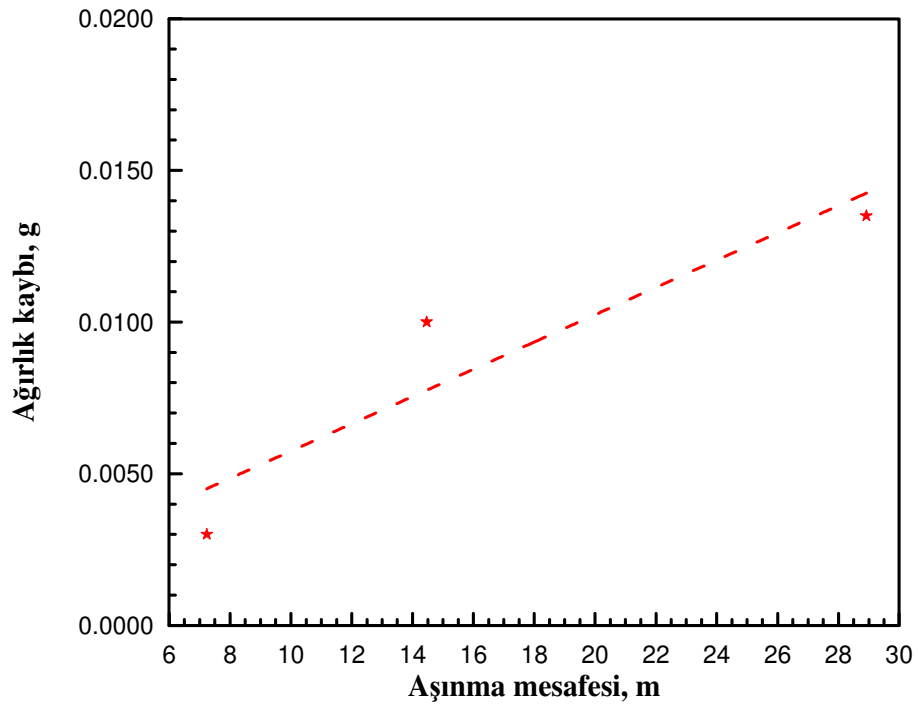
parametreleri değiştirilerek farklı gruplar oluşturulmuştur. Böylece kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin aşınma davranışı incelenirken, bu davranışa aşınma parametrelerinin etkisi de tespit edilmiştir.

Her bir aşınma parametresi (yük, aşınma mesafesi ve hız) için üç farklı değer kullanılarak deney kombinasyonu oluşturulmuştur. İki farklı malzeme (kaplanmış ve kaplanmamış) kullanılarak gerçekleştirilen deneyler 14 farklı kombinasyonu içermektedir. Yük, aşınma mesafesi ve hız parametreleri için kullanılan üç farklı değer belirlenmesi amacıyla ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Ön denemeler sonucunda ölçülebilir aşınma miktarları veren deney şartları belirlenerek deney parametreleri bu aralıklarda değiştirilmiştir. Her bir malzeme için belirlenen değerlere göre oluşturulmuş deney parametreleri tablosu aşağıda verilmiştir. Aşınma mesafesi olan 7,23 m, 14,46 m ve 28,92 m pin-on-disk tipi aşınma cihazında sırasıyla 1000 devir, 2000 devir ve 4000 devir, disk şeklindeki numunenin dönüş sayısına karşılık gelmektedir. Farklı aşınma deney şartlarında kaplanmış ve kaplanmamış numunelerde elde edilen ağırlık kayıpları Tablo 4.1’de verilmiştir.

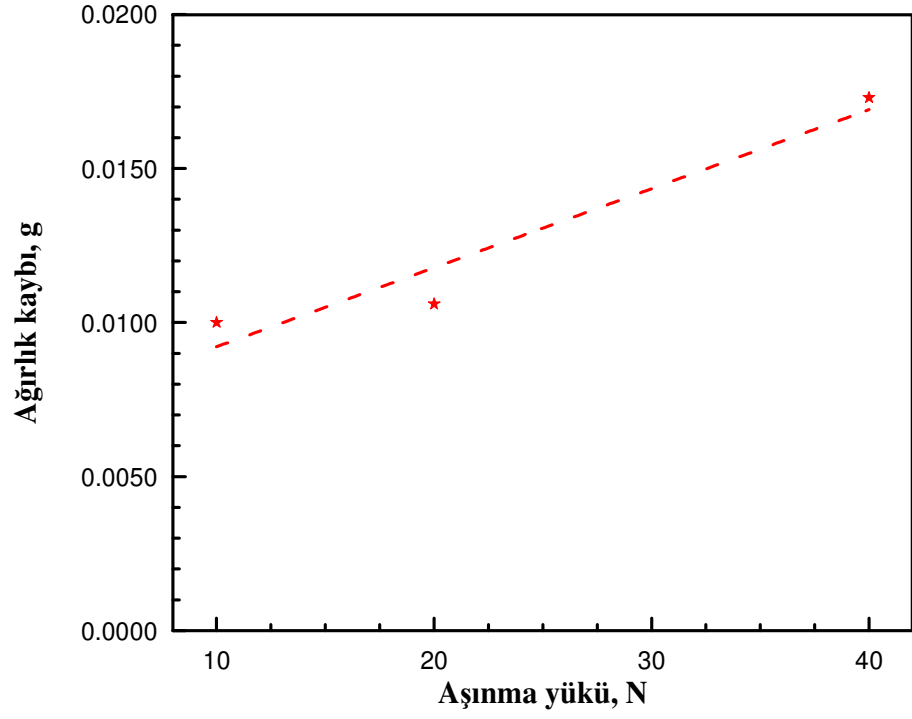
Kaplanmamış numunelerin farklı aşınma mesafelerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri; Şekil 4.4’de, farklı aşınma yüklerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri; Şekil 4.5’de ve farklı aşınma hızlarında aşınma ağırlık kaybı değişimleri; Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Y-PSZ Kaplanmış numunelerin aynı şartlardaki aşınma kaybı değişimleri sırasıyla Şekil 4.7-Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Şekil 4.10-Şekil 4.12’de ise kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin birbirleriyle kıyaslamalı grafikleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Kaplanmamış ve Y-PSZ kaplanmış numunelerin abrasif aşınmada ağırlık kayıpları.

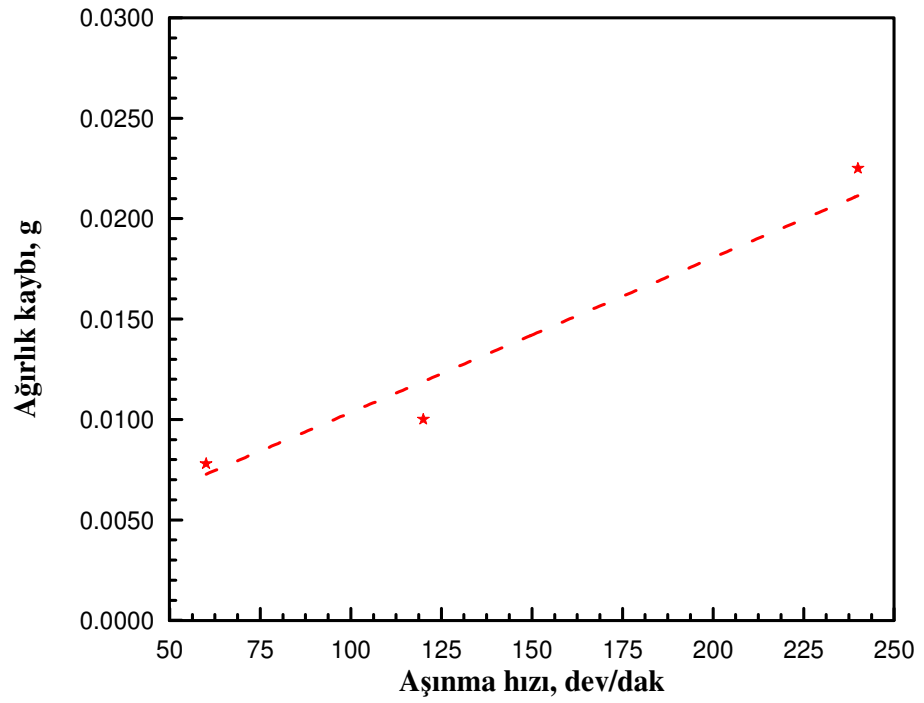
Y-PSZ ile ⇓	Mesafe (m)	Yük (N)	Hız (devir/dakika)	Ağırlık kaybı ΔG (g)
Kaplanmamış	7,23	10	60	0,00300
Kaplanmamış	14,46	10	60	0,00780
Kaplanmamış	28,92	10	60	0,01350
Kaplanmamış	14,46	20	60	0,01060
Kaplanmamış	14,46	40	60	0,01730
Kaplanmamış	14,46	10	120	0,01000
Kaplanmamış	14,46	10	240	0,02250
Kaplanmış	7,23	10	60	0,00005
Kaplanmış	14,46	10	60	0,00005
Kaplanmış	28,92	10	60	0,00005
Kaplanmış	14,46	20	60	0,00150
Kaplanmış	14,46	40	60	0,00245
Kaplanmış	14,46	10	120	0,00270
Kaplanmış	14,46	10	240	0,00295



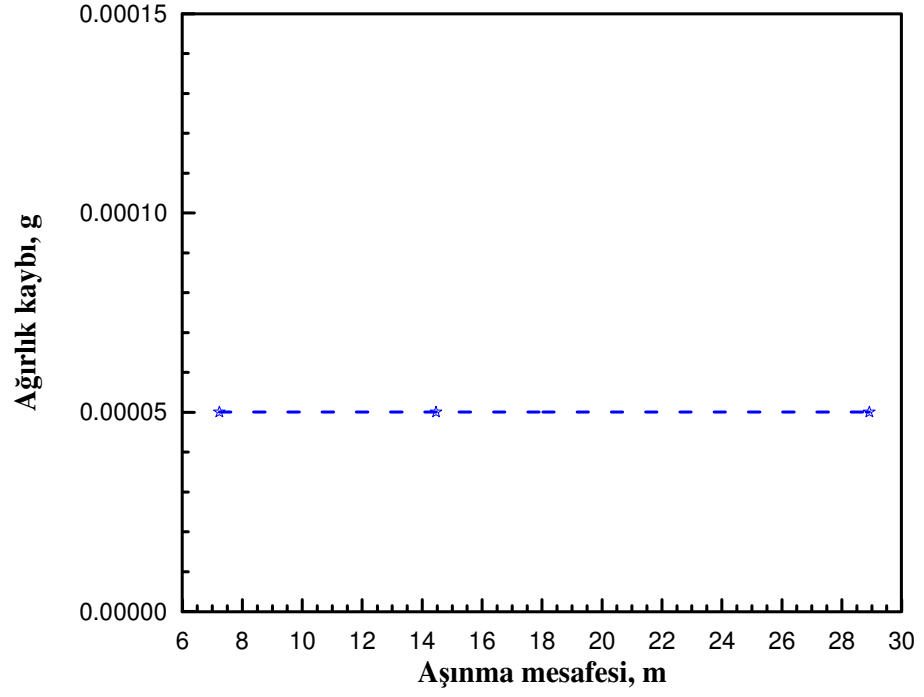
Şekil 4.4: Kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma mesafelerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



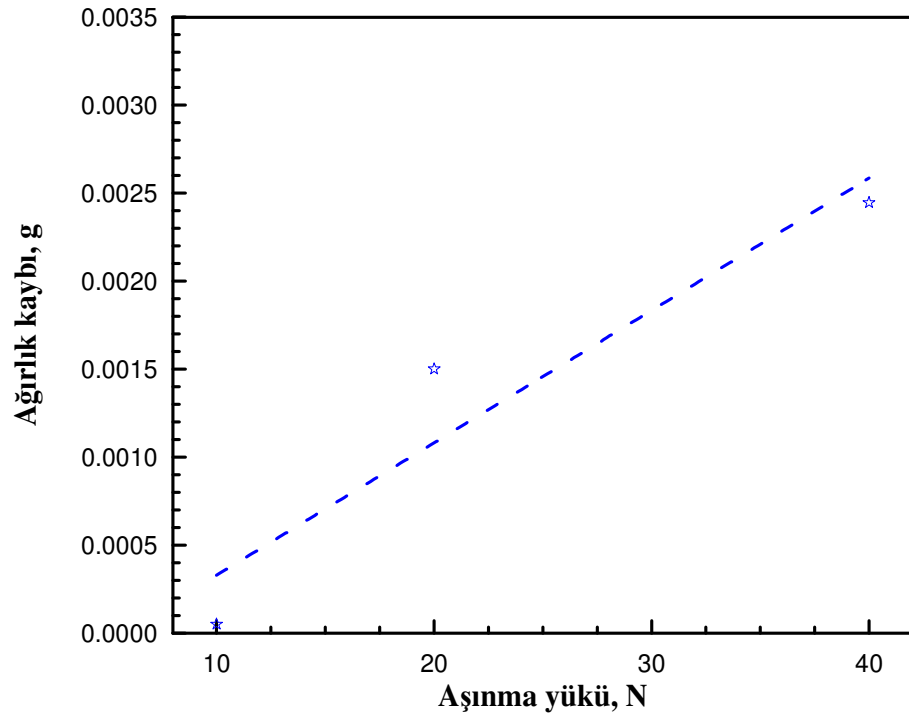
Şekil 4.5: Kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma yüklerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



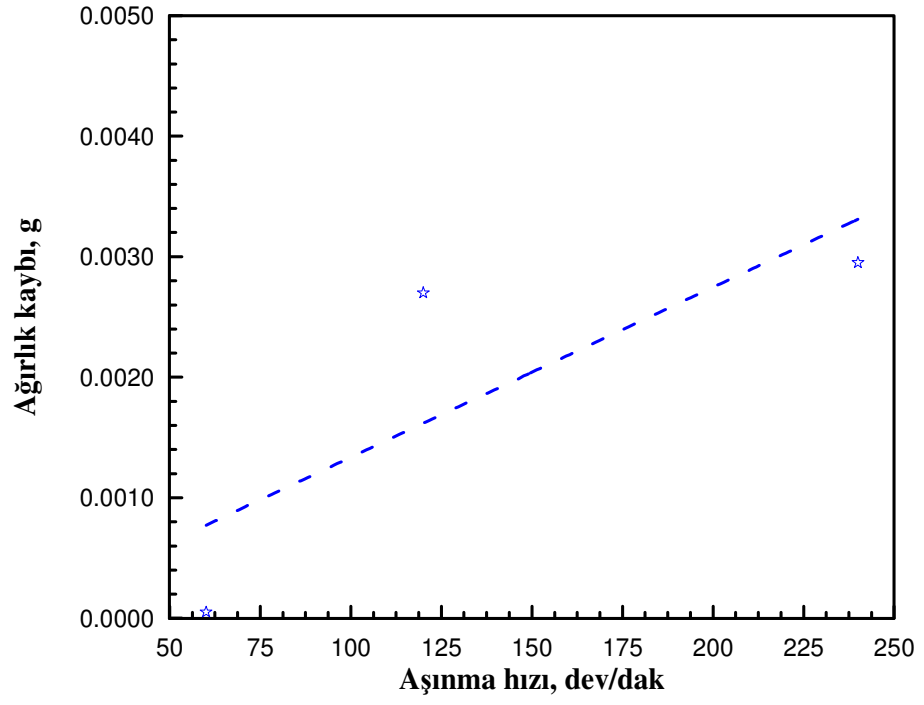
Şekil 4.6: Kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma hızlarında aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



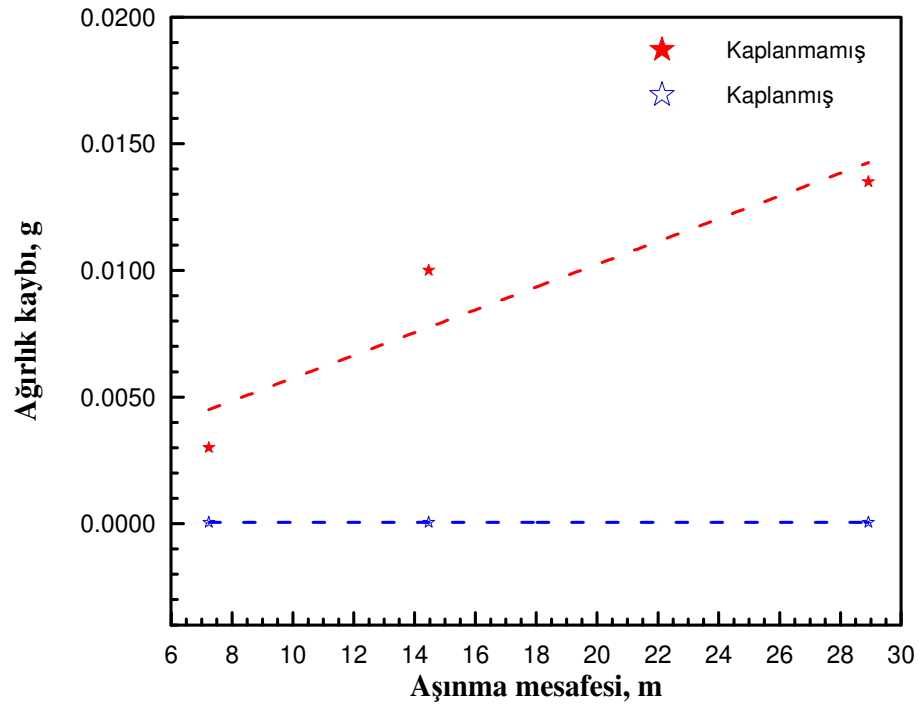
Şekil 4.7: Y-PSZ Kaplanmış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma mesafelerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



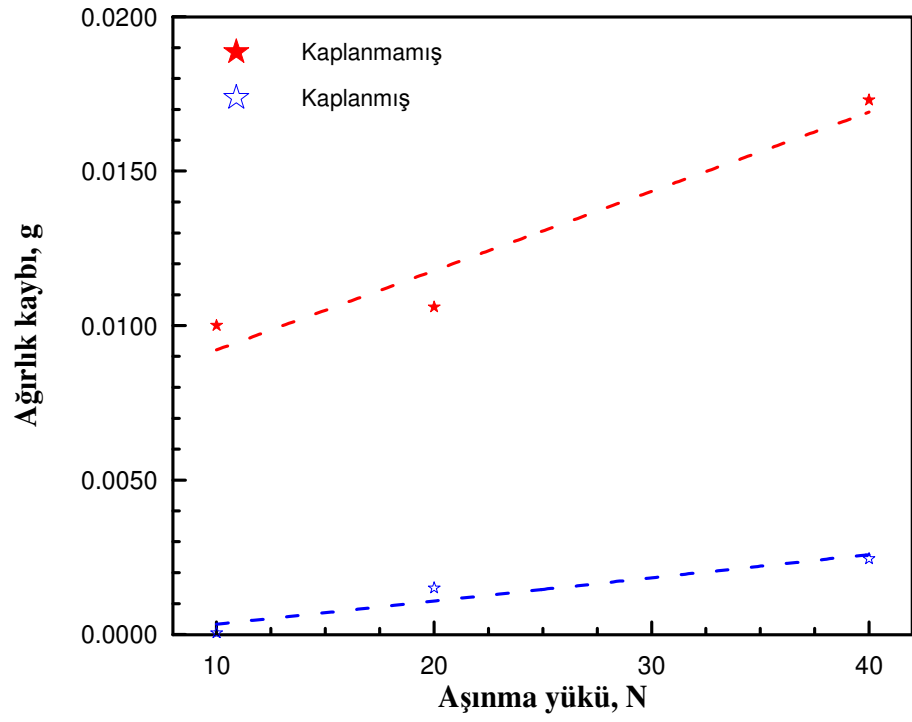
Şekil 4.8: Y-PSZ Kaplanmış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma yüklerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



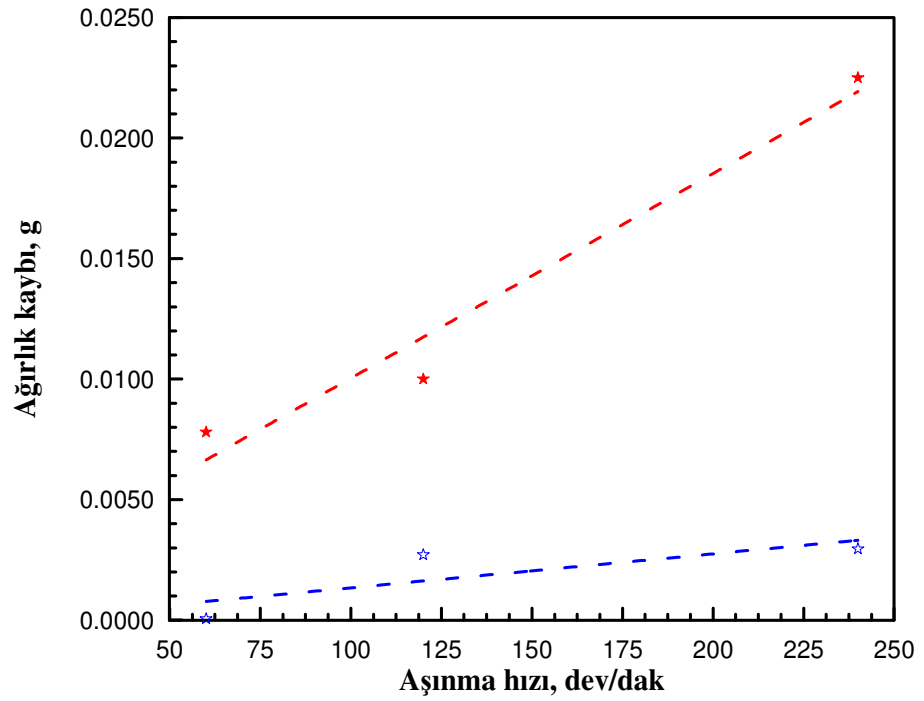
Şekil 4.9: Y-PSZ Kaplanmış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma hızlarında aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



Şekil 4.10: Y-PSZ Kaplanmış ve kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma mesafelerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



Şekil 4.11: Y-PSZ Kaplanmış ve kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma yüklerinde aşınma ağırlık kaybı değişimleri.



Şekil 4.12: Y-PSZ Kaplanmış ve kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma hızlarında aşınma ağırlık kaybı değişimleri.

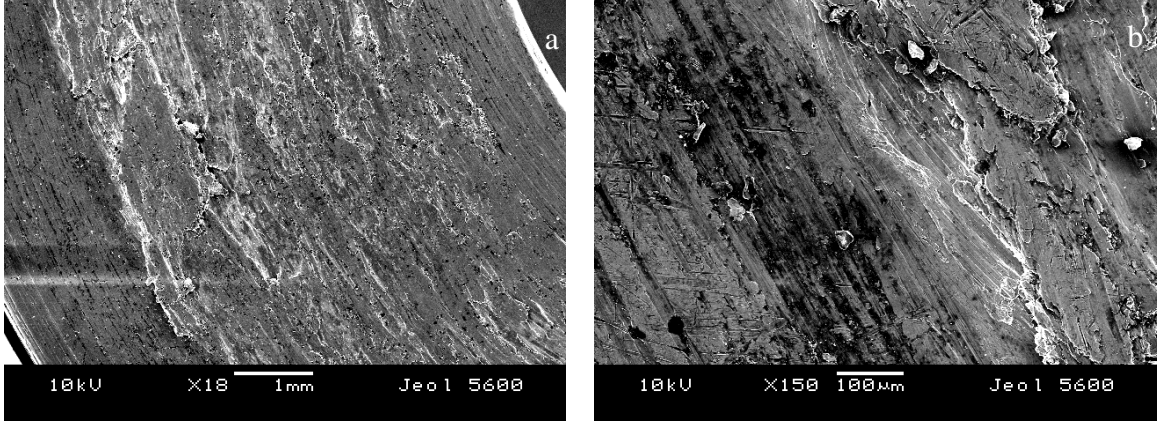
Kaplanmamış ve Y-PSZ Kaplanmış 6063 alüminyum alaşımlarının farklı aşınma parametrelerinde yapılan aşınma testlerinde; aşınma mesafesinin, aşınma yükünün ve aşınma hızının artmasıyla aşınma miktarının genel olarak arttığı belirlenmiştir. Tüm çalışma parametrelerinde Y-PSZ Kaplanmış 6063 alüminyum alaşımlarının aşınma miktarları, kaplanmamış olanlara kıyasla çok daha düşük düzeylerde olduğu görülmektedir (Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12). Plazma püskürtmeyle yapılan zirkonya kaplamanın 6063 alaşımının aşınma dayanımına oldukça önemli bir katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Deneyde kullanılan cihaz, aynı zamanda sürtünme katsayısı bilgisini de hesaplayarak bildirmektedir. Tüm deney şartlarında ölçülmüş kinetik sürtünme katsayılarının değişimi ve ortalaması Ek 1-14 arasında verilmiştir. Buna göre ortalama sürtünme katsayıları Tablo 4.2’de verilmiştir.

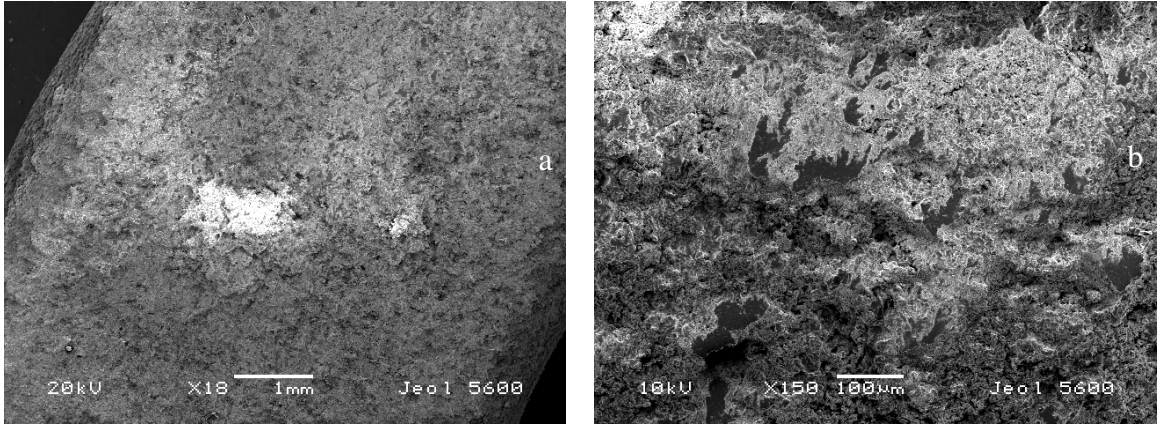
Tablo 4.2: Tüm deney şartlarında ölçülmüş ortalama kinetik sürtünme katsayıları.

	1000/10/60	2000/10/60	4000/10/60	2000/10/120	2000/10/240	2000/20/60	2000/40/60
Y-PSZ Kaplanmamış 6063-T6 Al alaşımı	0,158	0,135	0,122	0,165	0,235	0,124	0,114
Y-PSZ Kaplanmış 6063-T6 Al alaşımı	0,218	0,148	0,101	0,2	0,208	0,145	0,162

Aşınma deneyine tabi olunan kaplanmamış ve Y-PSZ kaplanmış numunelerden alınan örneklere uygulanan SEM analizi sonuçları Şekil 13 ve Şekil 14’da verilmiştir. Şekil 13 a-b, kaplanmamış 6063 numunesinin aşınma yüzeyi, Şekil 14 a-b, ise Y-PSZ kaplanmış numunenin aşınma yüzeyi görülmektedir.



Şekil 4.13: Aşınma deneyine tabi olunan kaplanmamış numunelerden alınan örneklere uygulanan SEM analizi sonuçları.



Şekil 14: Aşınma deneyine tabi olunan Y-PSZ kaplanmış numunelerden alınan örneklere uygulanan SEM analizi sonuçları.

4.5 SÜRÜNME DENEYİ SONUÇLARI

Sürünme denemelerinde 3 farklı sıcaklık ve 3 farklı gerilme şartlarında deneyler yapılmıştır. Uygulanan gerilmeler sırası ile; $\sigma_1 = 170\text{MPa}$, $\sigma_2 = 145\text{MPa}$ ve $\sigma_3 = 120\text{MPa}$ olarak seçilmiştir. Bu gerilmeler seçilirken deneylerde kullanacağımız 6063 alüminyum alaşımının akma sınırının altında kalmaya çalışılmıştır. Deneyler için seçilen sıcaklıklar ise; $T_1 = 150\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 125\text{ }^\circ\text{C}$ ve $T_3 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık ve gerilme parametrelerine göre oluşturulan deney setleri ise Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3: Deneylerde uygulanan gerilme ve sıcaklık setleri.

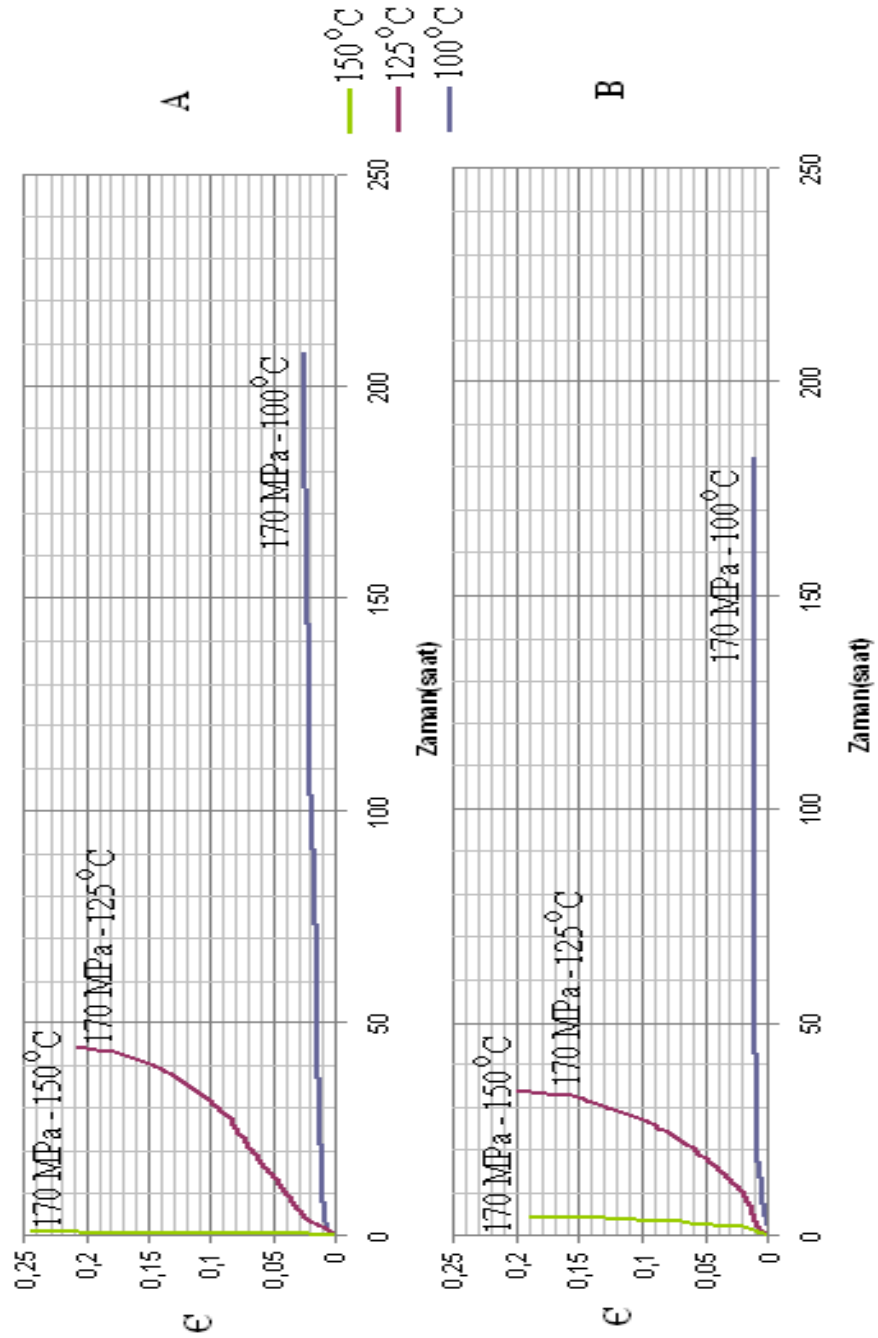
Uygulanan Gerilme, σ ↓	Uygulanan Sıcaklık, T		
	$T_1 = 150^\circ\text{C}$	$T_2 = 125^\circ\text{C}$	$T_3 = 100^\circ\text{C}$
$\sigma_1 = 170 \text{ MPa}$	X	X	X
$\sigma_2 = 145 \text{ MPa}$	X	--	--
$\sigma_3 = 120 \text{ MPa}$	X	--	--

Deney setlerinin bu şekilde belirlenmesindeki amaç;

- Sabit sıcaklık ve sabit gerilmeler altında Y-PSZ kaplanmış ve kaplanmamış 6063 alüminyum alaşımlarının sürünme özelliklerinin belirlenmesi, kararlı sürünme hızlarının ($\dot{\epsilon}$) hesaplanması ve zirkonya (Y-PSZ) kaplanmasının 6063 alüminyum alaşımının sürünme davranışına katkısını ortaya çıkarmak
- “Sıcaklığa” bağlı ve “Gerilmeye” bağlı sürünme parametrelerinin belirlenmesi, bir başka ifadeyle Üssel Sürünme Kanuna uygun olarak Arrhenius Denkleminde kullanılan “n” (gerilme faktörü) ve “Q” (aktivasyon enerjisi) ve “A₀” (malzemeye bağlı sabit) değerlerinin hesaplanması olarak ifade edilebilir.

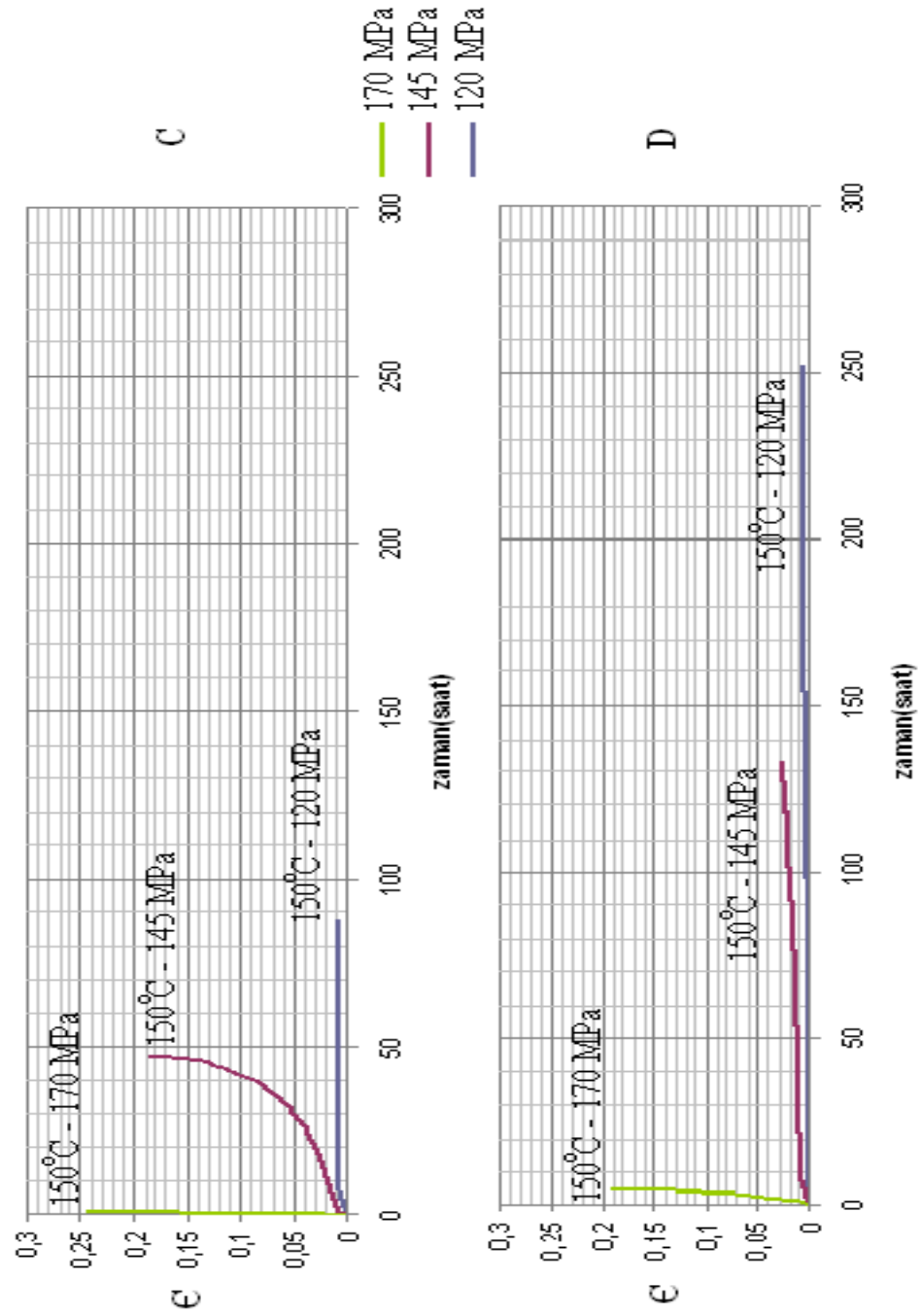
Yukarıda bahsedilmiş amaçlar doğrultusunda;

- $\sigma_1 - T_1$, $\sigma_1 - T_2$, $\sigma_1 - T_3$ sabit yük ve değişen sıcaklık şartlarında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15a.’da kaplanmamış ve Şekil 4.15b.’de kaplanmış 6063 alüminyum alaşımlarına ait sürünme eğrileri verilmiştir.



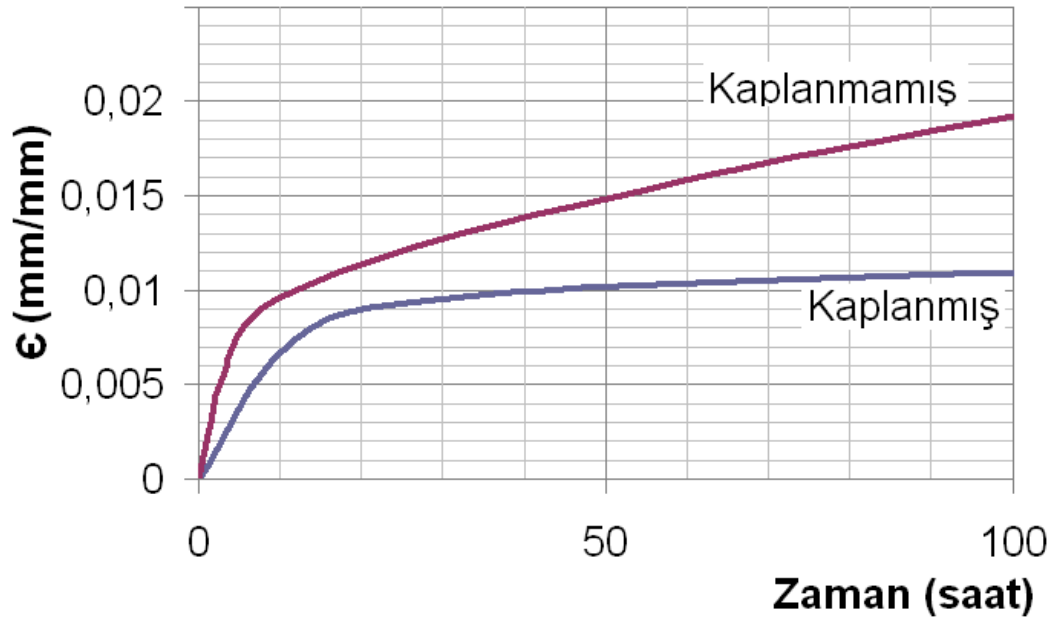
Şekil 4.15 : a ve b : 170 MPa sabit yük altında üç farklı sıcaklıkta ($\sigma_1 - T1$, $\sigma_1 - T2$, $\sigma_1 - T3$) numunelerinin sürünme davranışları (A: kaplanmamış , B: kaplanmış numuneler).

- $\sigma_1 - T1$, $\sigma_1 - T2$, $\sigma_1 - T3$ sabit gerilme ve değişen sıcaklık şartlarında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı olarak Şekil 4.16c.'de kaplanmamış ve Şekil 4.16d.'de kaplanmış 6063 alüminyum alaşımlarına ait sürünme eğrileri verilmiştir.

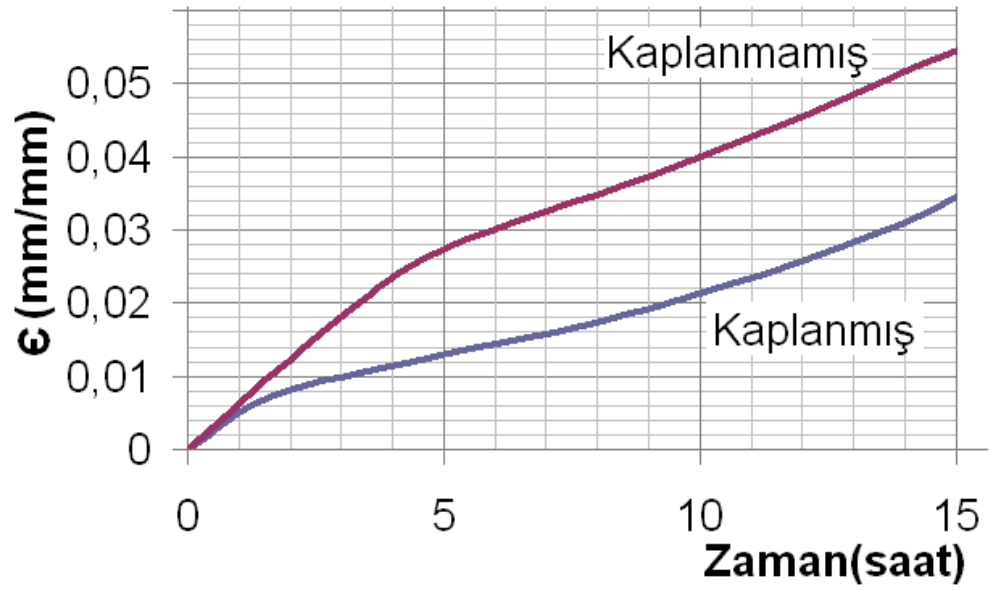


Şekil 4.16: c ve d: 150 °C sabit sıcaklık altında üç farklı gerilme ($\sigma_1 - T1$, $\sigma_2 - T1$, $\sigma_3 - T1$) numunelerinin sürünme davranışları (C: Kaplanmış, D: Kaplanmamış numuneler).

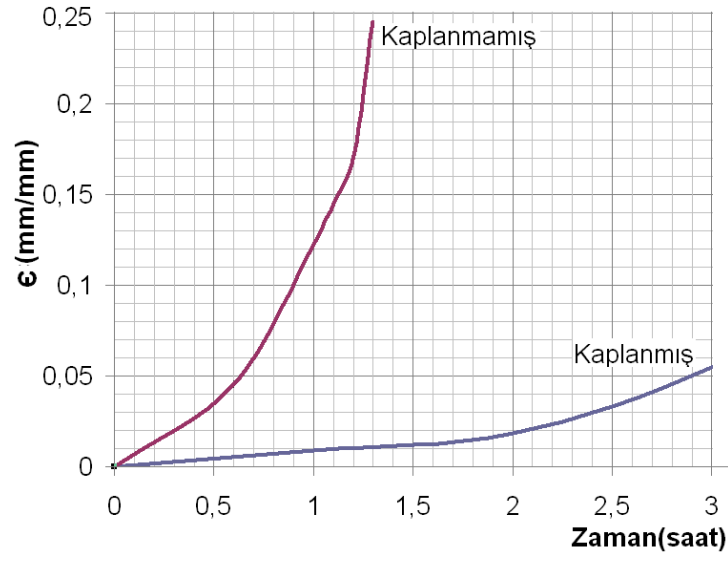
Burada elde edilen sonuçları 6063 alüminyum alaşımının ısıl püskürtme yöntemiyle Y-PSZ ile kaplamanın sürünme dayanımına katkısının görülebilmesi için Şekil 17- Şekil 21'de kaplanmamış ile kaplanmış numunelerin karşılaştırılmalı sürünme eğrileri gösterilmiştir.



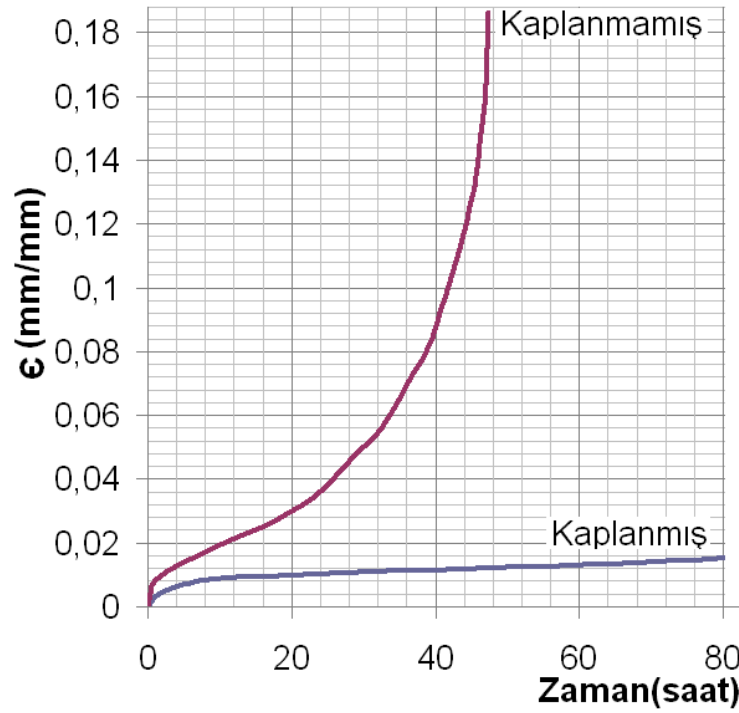
Şekil 4.17 : 170 MPa gerilim ve 100 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması.



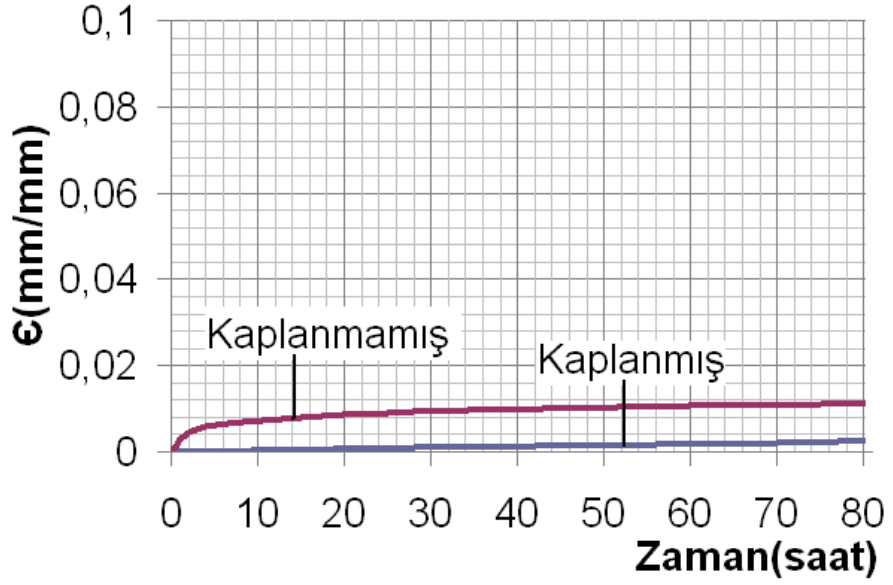
Şekil 4.18: 170 MPa gerilim ve 125 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.19: 170 MPa gerilim ve 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.20: 145 MPa gerilim ve 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması.

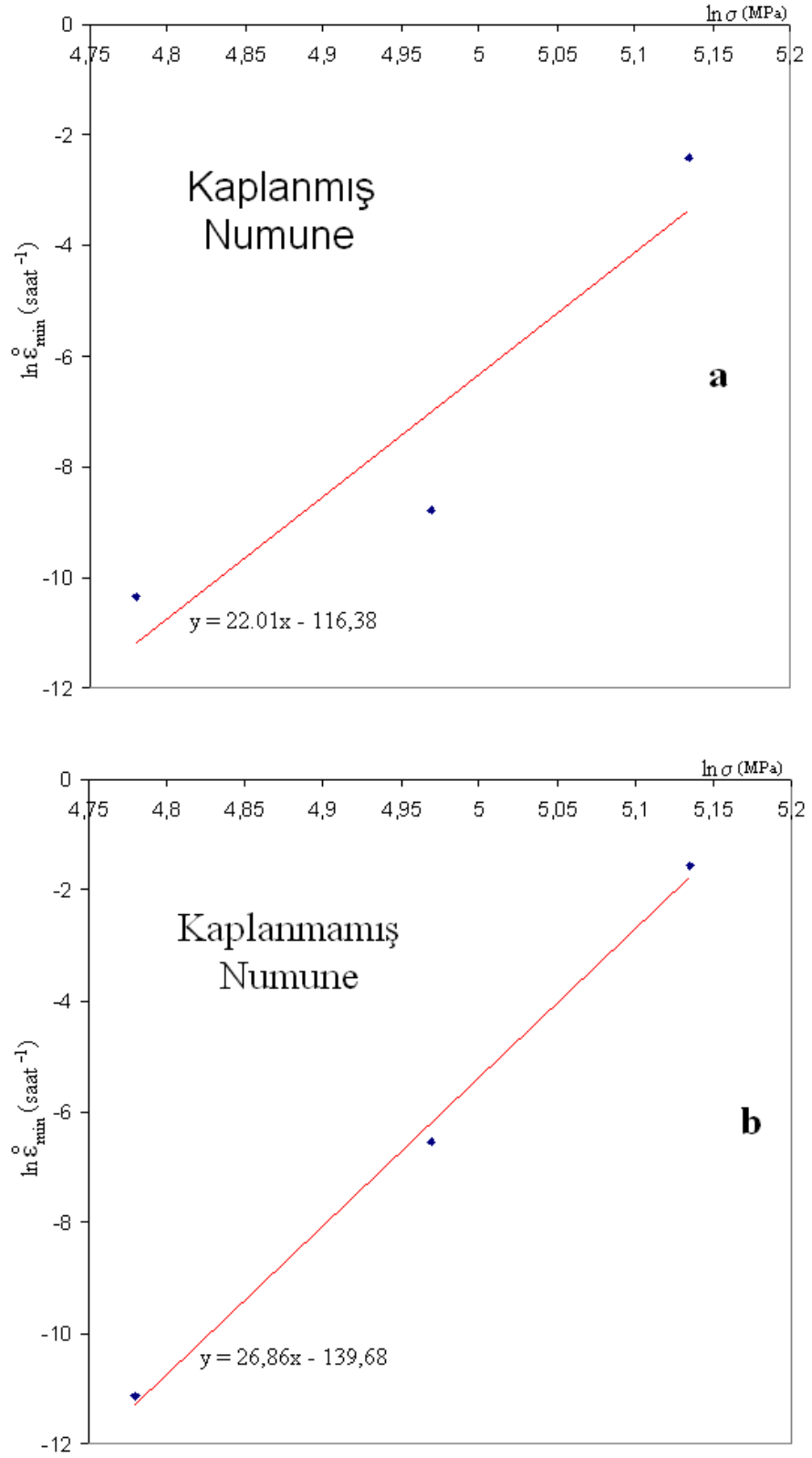


Şekil 4.21: 120 MPa gerilim ve 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sürünme deneylerinin karşılaştırılması.

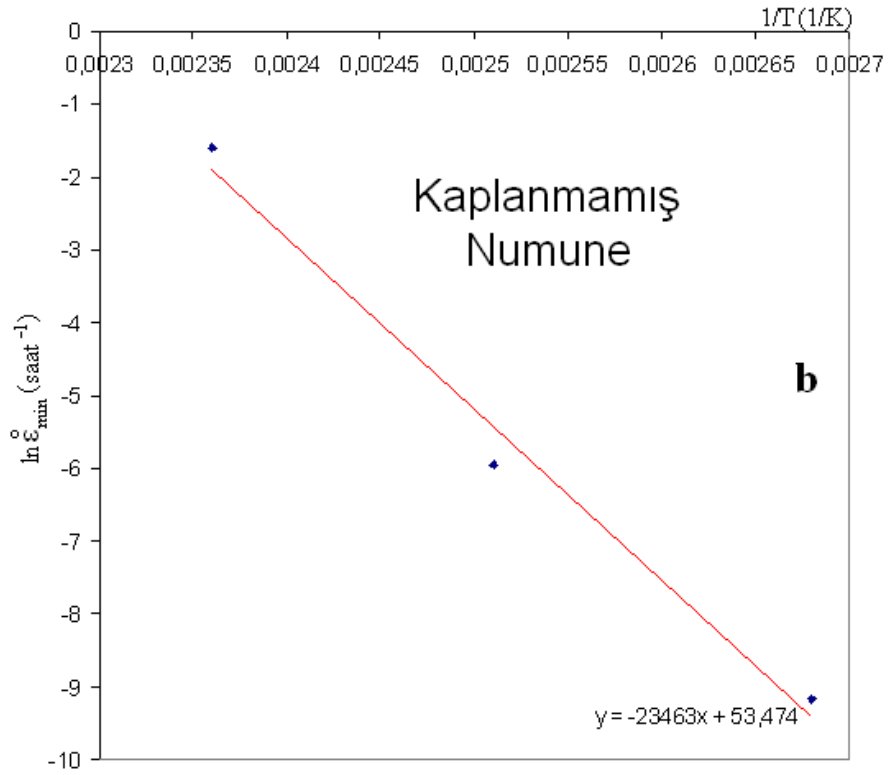
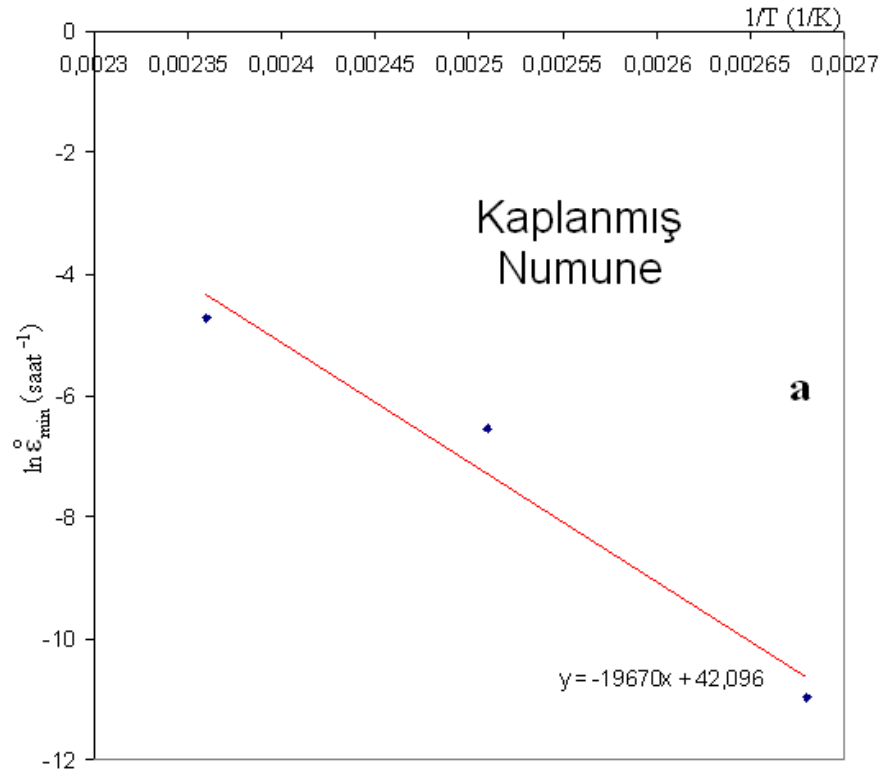
Yukarıda görüldüğü gibi elde edilen sıcaklığa bağlı ve gerilmeye bağlı sürünme eğrileri ve Arrhenius Denklemi yardımıyla;

$$\dot{\epsilon} = A_0 \cdot \sigma_{uyg}^n \cdot e^{-(Q/RT_{uyg})} \quad (4.1)$$

- Sabit sıcaklık ve değişen basınç durumu için $\ln \dot{\epsilon} = [\ln A_0 - Q/RT_{sbt}] + n \ln \sigma_{uyg}$ şeklinde ifade edilerek, gerekli hesaplamaların ardından Y-PSZ kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin sürünme sonuçlarına göre $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_{uyg}$ arasında grafikler çizilmiştir. Bu grafikler Şekil 4.22a ve 4.22b’de verilmiştir. Grafiklerde görülen doğruların eğimi sürünmedeki gerilme faktörü (n) değerini vermektedir. Yapılan hesaplamalar sonucu;
 - Y-PSZ kaplanmamış 6063 alaşımı için $n = 26.86 \text{ (MPa.h)}^{-1}$
 - Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımı için $n = 22.01 \text{ (MPa.h)}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.22: Y-PSZ kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin sürünme sonuçlarına göre $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma_{uyg}$ arasında grafik. a) Y-PSZ kaplanmış b) kaplanmamış 6063 alaşımı.



Şekil 4.23: Y-PSZ kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin sürünme sonuçlarına göre $\ln \dot{\epsilon}$ - $1/T$ arasında grafik. a) Y-PSZ kaplanmış b) kaplanmamış 6063 alaşımı.

➤ Sabit basınç ve değişen sıcaklık durumu için; $\ln \dot{\epsilon} = [\ln A_0 + n \ln \sigma_{sbt}] - Q/RT_{uyg}$ şeklinde ifade edilerek, gerekli hesaplamaların ardından Y-PSZ kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin sürünme sonuçlarına göre $\ln \dot{\epsilon}$ - $1/T$ arasında grafikler çizilmiştir. Bu grafikler ise Şekil 4.23a ve 4.23b’de sergilenmiştir. Grafiklerde görülen doğruların eğimi $-Q/R$ ’yi vermektedir. Buradan Sürünme Aktivasyon Enerjisi (Q) değerinin hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu;

- Y-PSZ kaplanmamış 6063 alaşımı için **Q = 195 kJ**
- Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımı için **Q = 164 kJ** olarak hesaplanmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Hafif alaşımlar grubuna giren alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluğu, yüksek korozyon dayanımı gibi çok önemli özellikleri nedeniyle teknolojide daha fazla yer alabilmesini sağlamak için düşük olan mekanik mukavemet özelliklerinin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmış/yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında yaşlandırmayla mukavemet kazandırılabilen alüminyum alaşımlarından olan, otomotiv ve yapı başta olmak üzere birçok yerde kullanım alanı bulunan 6063-T6 alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin daha da geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; T6 yaşlandırma ısıtma işlemi uygulandıktan sonra 6063 alaşımı yüzeyi sert seramik ile kaplanarak malzeme biliminde tok ve mukavemetli malzemeler için tanımlanan yüzeyi sert içi yumuşak malzeme üretimi hedeflenmiştir.

Isıl püskürtme yöntemlerinden birisi olan plazma püskürtme yöntemi, metal yüzeylerinin seramik tozlarıyla kaplanmasına olanak veren çeşitli uygulamalardan biridir. Tez çalışmasında Bölüm 3.1’de açıklandığı şekilde 6063-T6 alaşımından şekillendirilmiş numunelerin yüzeyine önce Ni-Al astar malzemesi sonrasında ise ağırlık %8Y₂O₃ ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya (Y-PSZ) seramik tozları, atmosferik ortamda plazma tabancası ile yüksek sıcaklık ve hızda püskürtülerek kaplama gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi; 6063 alüminyum alaşımı altlık ve onun üzerinde ~36 µm astar tabakası ve en üstte de 140-155 µm kalınlığındaki zirkonya tabakası şeklindeki kompozit yapı elde edilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde tabakalar arası güçlü bağların oluştuğu görülmektedir.

Bu şekilde elde edilen Y-PSZ kaplanmış 6063 numuneleri ile aynı incelemelere tabi tutularak kıyaslama yapılabilmesi için, kaplanmışların yanı sıra kaplanmamış 6063 numuneleri de üretilerek; sertlik, darbe dayanımı, abrasif aşınma ve sürünme gibi mekanik özelliklerini belirleyen deneyler birlikte gerçekleştirilmiştir. Yapılan mekanik test ve deneylerin hepsinde Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımlarının özelliklerinin kaplanmamış olanlara göre daha üstün olduğu görülmüştür.

Sünek bir malzeme olan 6063 alüminyum alaşımının Y-PSZ kaplanması ile mukavemetinde önemli oranda artış sağlanabilmektedir, zira sünek altlık malzemelerinin sert seramikle kaplanması tok ve mukavemetli yapıların elde edilmesinde önemli ve etkin bir yoldur. Sert seramik kaplamaların sağladığı olumlu etkiye ilave olarak özellikle Y-PSZ ile kaplanmış 6063 alaşımının mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde elde edilmiş olumlu özellikler, Bölüm 2.4.2’de açıklandığı gibi kısmen stabilize edilmiş zirkonyanın iyi bilinen dönüşüm toklaştırıcı (transformation toughness) etkisinin de sonucudur. Bilindiği gibi kırılma yapı içindeki çatlakların ilerlemesi ile gerçekleşen bir olgudur. Gerilme altında çatlak ucunda gerilme enerjisi, çatlak yüzey alanını genişletmek üzere kullanılır. Ağ.%8 Y_2O_3 ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya-yapısında kararsız halde bulunan tetragonal (t) ve kübik (k) zirkonya fazlarının, oda sıcaklığındaki kararlı faz olan monoklinik (m) faza dönüşümünde kullanılmak üzere mekanik zorlanmalar altında uyarılmış çatlakların ucundaki enerjiyi absorbe ederek çatlakların ilerlemesini engeller [17]. Genel olarak bilindiği gibi ve elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi sünek özelliğe sahip 6063 alaşımı, gerilme ve sıcaklık altında kolay şekil değiştirmektedir. 6063 altlık üzerine plazma püskürtmeyle Y-PSZ kaplanmış numunelerde altlık malzemesi, sünek davranışı nedeniyle şekil değiştirmek isterken altlık-kaplama ara yüzeyinden itibaren kaplamaya doğru çeşitli yönlerde gerilmeler uygulamaktadır. Çekme sırasında tabakaya paralel yönde, sıcaklığın etkisi altında ise tabakaya dik yönde gelişen bu gerilmeler altında, kaplama tabakası ara yüzeyden itibaren çekme ve basma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu zorlanmalar altında altlık-tabaka ara yüzeyinden itibaren uyarılan çatlaklar, zirkonyadaki (t, k→m) dönüşüm toklaştırıcı etkisi ile ilerleyememekte ve genel olarak malzemenin mukavemet kazandığı görülmektedir.

Aşağıda çeşitli mekanik özellikler açısından elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

- Kaplamaya dik gerçekleştirilen sertlik sonuçlarına bakıldığında; kaplanmamış 6063 numunelerinin ortalama sertlik değeri **~80 HV3**, Y-PSZ kaplanmış numunelerde ise **~266 HV3** gibi bir sertlik değerine ulaşıldığı görülmektedir. 150 µm. kalınlığındaki Y-PSZ kaplama tabakası ile 6063 alaşımının sertliği üç kat daha yükseltilebilmiştir. Bunun yanında kaplamalı yüzeyin kesitine dik yönde gerçekleştirilen mikro sertlik sonucuna göre beklendiği gibi kaplama

kımında 818 HV100, astar kımında 173 HV100 ve altlık kımında ise 60 HV100 mikro sertlik değeri ölçölmüştür. 150µm’luk ince kaplama tabakasına dik yönde ölçölen daha düşük sertlik değeri, kaplama altındaki sünek alüminyum yapısından dolayı daha düşük çıkmaktadır.

- Kırılma mukavemetlerinin ve darbe dayanımlarının belirlenmesi için yapılan darbe testleri sonuçlarına göre; kaplanmamış numunelerin ortalama **50 J** olan darbe enerjileri, Y-PSZ kaplanmış numunelerde iki katını aşarak **103 J** olarak ölçölmüştür. Y-PSZ kaplamanın 6063 alaşımının tokluğunu önemli ölçüde arttırdığı görölmektedir.
- Abrasif aşınma dayanımları karşılaştırıldığında; kaplanmış numunelerin planlanan deney şartlarında ortalama olarak 10 kat daha yüksek aşınma direncine sahip oldukları görölmektedir. “Aşınma yükü”, “aşınma mesafesi” ve “aşınma hızı” deney parametrelerinin artırılmasının her iki malzemede de (kaplanmamış ve Y-PSZ kaplanmış) aşınma miktarını artırdığı belirlenmiştir. En düşük aşınma miktarları kaplanmış malzemede 10 N yük altında, 60 devir/dakika hızda yapılan deneylerde elde edilmiştir. En yüksek aşınma miktarı ise kaplanmamış malzemede 10 N yük altında, 240 devir/dakika hızda ve 14,46 m (2000 tur) mesafede meydana gelmiştir. Numune yüzeylerindeki aşınmanın mikrografik incelemesi sonucu elde edilen SEM analizi sonuçlarına bakıldığında beklendiği gibi kaplanmamış 6063 numunesinin yüzeyindeki aşınma yolu çizgileri sünek şekil değişimleri sonucu derin ve belirgin olduğu görölmüştür (Şekil 13 a-b). Kaplanmış 6063 numunelerinin yüzeyine püskürtölmüş zirkonya tanelerinin altlık yüzeyinde rastgele yerleşimi ve sert seramik bir yapı oluşturması sonucu aşınma yollarında, gevrek kırılmaların oluştuğu tespit edilmiştir. Yüzey morfolojisine bağılı olarak yüksek bölgelerde aşınmanın daha yoğun olduğu gözlenmektedir. Ancak gözenekli ve pürüzlü yüzey yapısına sahip olmasına rağmen Y-PSZ kaplanmış 6063 numunelerinin yüzeyindeki aşınma çizgileri yine de belirgin bir ize sahip değildir (Şekil 14 a-b). Sonuç olarak kaplamalı malzemelerin aşınmaya maruz kalınan çalışma şartlarında çok daha yüksek performans gösterecekleri anlaşılmaktadır.

Deneyde kullanılan cihaz, aynı zamanda sürtünme katsayısı bilgisini de hesaplayarak bildirmektedir. Tüm deney şartlarında ölçülmüş kinetik sürtünme katsayılarının değişimi ve ortalaması, tezin sonundaki Ekler bölümünde verilmiştir (Şekil Ek 1-14). Buna bakıldığında sürtünme katsayısının her iki grup malzeme için ortalama 0,1-0,2 aralığında olduğu belirlenmiştir.

- Sürtünme testi sonuçlarına bakıldığında; Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımı, kaplanmamış olanlarına göre daha yüksek sürtünme dayanımı, daha düşük sürtünme hızı ve daha uzun sürtünme kopma süresi gösterdiği tespit edilmiştir.

Gerilmeye ve sıcaklığa bağlı sürtünme deneyleri sonuçlarının Bölüm 3.8’de açıklandığı gibi Üssel Sürtünme Kanunu (power law creep)’na uygun olarak değerlendirilmesiyle elde edilen *aktivasyon enerjisi* (Q); kaplanmamış 6063 alaşımı için **$Q=195$ kJ/mol**, Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımı için ise **$Q=164$ kJ/mol** olarak hesaplanmıştır. Y-PSZ ile kaplanması sonucu 6063 alaşımının sürtünme aktivasyon enerjisi düşmüştür. Böylece Bölüm 3.8.1.2.’de açıklanan *yayınma (difüzyon) sürtünmesine* dayalı sürtünme mekanizmasının etkinliği azaltılarak sürtünme dayanımı artırılmıştır.

Yüksek sabit gerilmeler altında gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlara dayalı olarak yapılan bir diğer hesaplamalar sonucu *gerilme faktörü* (n) ise; kaplanmamış için **$n = 26.86$ (MPa.saatt)⁻¹** Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımı için **$n = 22.01$ (MPa.saatt)⁻¹** olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi Y-PSZ ile kaplanması sonucu 6063 alaşımının sürtünmedeki gerilme faktörü daha düşük çıkmıştır. Böylece Bölüm 3.8.1.1.’de açıklanan *dislokasyon sürtünmesine* dayalı sürtünme mekanizmasının etkinliği, Y-PSZ kaplanmış 6063 alaşımında azaltılarak gerilme etkisindeki sürtünme dayanımı artırılmıştır.

Literatürde yapılan araştırmalara bakıldığında ektrüzyonla şekillendirilmiş Al-Mg tipi yaşlandırma alaşımlarının sürtünme davranışına benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu tür alaşımlar, görece yüksek görünür aktivasyon enerjisi ve yüksek gerilme faktörü göstermektedir. Bu nedenle bunlar, eşik değer gerilmesine sahip sürtünme davranışı (threshold type creep behaviour) gösteren malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Buna göre sürtünme sırasında sürtünme

sıcaklığı arttıkça değeri azalan bir eşik değer gerilmesi ($\sigma_{\text{threshold}}$) bulunmaktadır ve sürünmede yapılan net iş, eşik değer gerilmesinin üzerindeki efektif gerilme ($\sigma_{\text{uyg}} - \sigma_{\text{threshold}}$) değerinde gerçekleşmektedir [39,40]. Bu bahsedilen eşik değer gerilmesinin yapılacak ek çalışmalarla hesaplanması yararlı olacaktır.

Görüldüğü gibi 6063 alüminyum altlık üzerine ağırlıkça %8 Y_2O_3 ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya seramik malzemesi plazma püskürtme yöntemiyle kaplandığında, yukarıda açıklanan mekanik özelliklerin yüksek oranda geliştirilebildiği görülmüştür. Bu tez çalışmasının sonucunda; plazma püskürtme yöntemiyle Y-PSZ gibi sert seramik malzemelerin alüminyum alaşımı altlıklar üzerine kaplanmasıyla düşük ergime sıcaklığı ve mekanik özelliklerine rağmen düşük yoğunluğuyla talep edilen alüminyum alaşımlarının daha yüksek sıcaklık ve daha zor mekanik şartlar altında daha uzun servis ömürlü hale getirilebileceği belirlenmiştir.

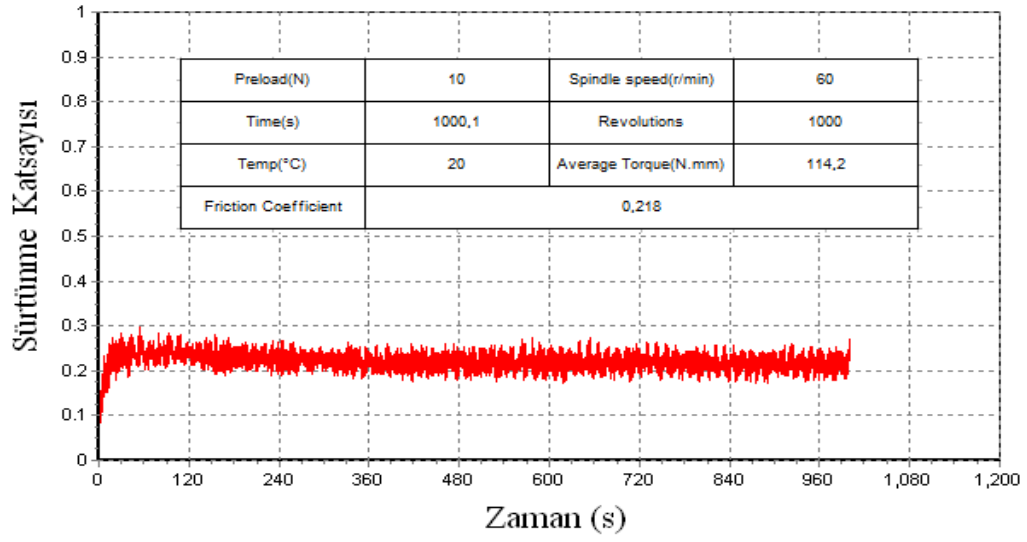
KAYNAKLAR

- 1 GADOW, R., SCHERER, D., 2000. Combined Coatings on Light Metal Alloys for Applications Under Dry Sliding Conditions, *10th International Metallurgy and Materials Congress*, İstanbul, Türkiye, 24-28 Mayıs, 861-868.
- 2 WANG, L., NİE, X., 2006, Silicon Effects on Formation of EPO Oxide Coatings on Aluminum Alloys, *Thin Solid Films*, 494, 211-218.
- 3 XIN, S.G., SONG L.X., ZHAO R.G. and HU X.F, 2006, Composition and Thermal Properties of the Coating Containing Mullite and Alumina, *Materials Chemistry and Physics*, 97 (1), 132-136.
- 4 KATO, K., 2000, Wear in Relation to Friction a Review, *Wear*, 241, 151-157.
- 5 TUCKER, R.C., PAULEAU, Y., BARNA, P.B., 1997. The Use of Thermal Spray Coatings for Protection Against Wear and Corrosion, *Protective Coatings and Thin Films*. Kluwer Academic Publications, 387-399.
- 6 JOSEP, A.P., 2005, HVOF Thermal Sprayed Coatings on Aluminum Alloys and Aluminum Matrix Composites, *Surface and Coatings Technology*, 52-56.
- 7 BARBEZAT, G., 2005, Advanced Thermal Spray Technology and Coating for Lightweight Engine Blocks for The Automotive Industry, *Surface and Coatings Technology*, 200, 1990-1993.
- 8 ASM International, *Surface Cleaning, Finishing and Coating*, 1990, ASM Handbook, 9th edition, Vol 5, 150-158.
- 9 GEIGER, G., 1992. Ceramic Coatings, *American Ceramic Society Bulletin*, 1470-1472.
- 10 WANG, W., 2005, Effect of Specimen Geometry on Fracture Toughness Measurement of Plasma Sprayed Ceramic Coatings by The Tapered Double Cantilever Beam Approach, *Vacuum*, 73, 649-654.
- 11 SALMAN, S., 2005., An Investigation of Different Ceramic Coating Thermal Properties, *Materials and Design*, 27, 585-590.
- 12 AKBULUT S., YILDIRIM S., YILMAZ S., 2004, Mechanical Behaviour and Abrasive Wear Resistance of Ce-PSZ Dispersed Alumina Matrix Composites, *Key Eng Mat*, 264-268, 1021-1024.

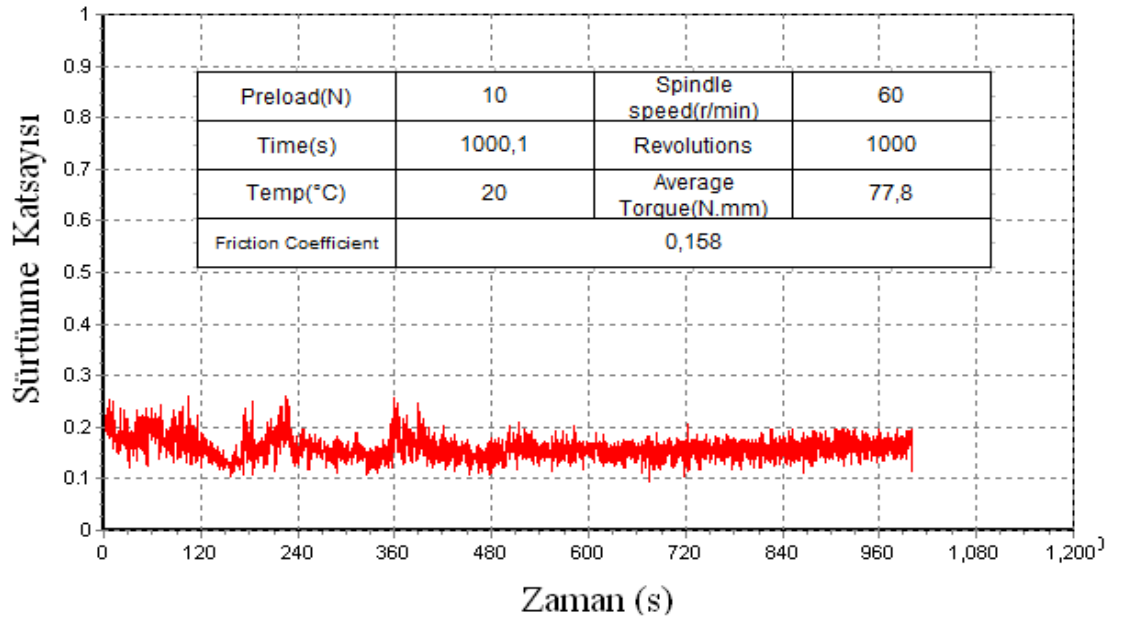
- 13 YILMAZ, S. VE ÖZGEN,S., 1993, Ce-Stabilizeli Zirkonya-Alümina Seramik Kompozitlerinin İncelenmesi, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Vol:2, TMMOB, Ankara , 1229-1242.
- 14 RAMASWAMY, P., 1999, Evaluation of Cao–Ceo2–Partially Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings, *Ceramics International*, 25, 317-324.
- 15 SHIN, J.H., 2000, Effect of Annealing and Fe₂O₃ Addition On The High Temperature Tribological Behavior of The Plasma Sprayed Yttria-Stabilized Zirconia Coating, *Surface and Coatings Technology*, 133-134, 403-410.
- 16 CAO, X.Q., 2003, Ceramics Material for Thermal Barrier Coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 24,1-10.
- 17 YILMAZ, S., 1992, Alümina İçeren Seramik Kompozitlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 18 ÇEVİK, İ., 1990, Zirkonya Esaslı Seramik Kaplamanın Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Değiştirilmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 19 XIONG, H.B., 2005, Melting and Oxidation Behavior of In-Flight Particles in Plasma Spray Process, *Heat and Mass Transfer*, 48, 5121-5133.
- 20 ULUCAK T., AA6063 Alüminyum Alaşımlarının Metalurjisi <http://www.aluminyumsanayi.com/6063metalurji.htm>, [Ziyaret Tarihi: 06.04.2010]
- 21 SALMAN, S., 1995, Plazma ve Alev Püskürtme Tekniğiyle Al₂O₃ - %13tio₃ ve Cr₂O₃ - %5sio₂ - %3tio₂ Seramik Kaplanan Malzemelerin Özellikleri, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 22 ÇELİK, E., SOYKAN, Ş., AVCI, E., 1994, Seramik Kaplanmış Malzemelerin Ekonomikliğinin İncelenmesi, II. Uluslararası seramik kongresi, Bildiriler kitabı, İstanbul, 419-429.
- 23 HOCKING, M.G., VASANTASREE, V, SIDKY, P.S., 1989, *Metallic and Ceramic Coatings: Production High Temperature and Applications*, London.
- 24 ARIN, M., 2007, Zirkonya Seramiklerinin ve Zro₂ - Tin Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 25 GEÇKİNLİ, E.A., 1992, İleri teknoloji malzemeler, İ.T.Ü., 55-72.
- 26 DoITPoMS Teaching and Learning Packages, University of Cambridge, <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/printall.php>, [Ziyaret tarihi: 07.04.2010]

- 27 STRAFFORD, K.N., DATA, P.K., GRAY, J.S., 1990, *Surface Engineering Practice Process, Fundamentals and Application and Wear*, , West Sussex, England, 19-21.
- 28 RICKERBY, D.S., MATTHEWS, A., 1991, *Advanced Surface Coatings: a Handbook of Surface Engineering*, 4-13, New York, ABD
- 29 ASKAYNAK, 1991, *Termik püskürtme notları*, İstanbul.
- 30 MATTOX, D.M, 1995, Plasma Technology: Plasma Chemistry, Educational Guide to Vacuum Deposition Technology, *SVC Publications*.
- 31 GRIFFITHS, B.J., GAWNE, D.T. ve DONG, G., 1997, The Role Of GritBlasting in the Production of High-Adhesion Plasma Sprayed Alumina Coatings, *Proc. Insttn. Mech. Engrs.*, Vol.211 Part B.
- 32 BREAM, B., 2000, Performance and Durability of High Temperature Oil-Free Turbomechinery, NASA/TM-2000-209187/REV1.
- 33 DUAN, Z., SCHEIN, J. ve HEBERLEIN, J., 2000, *Investigation of Plasma Instabilities in a Spray Torch*, Ph.D. Thesis, University of Minnesota, NFS/INT-9415715.
- 34 Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry, <http://www.gordonengland.co.uk/>, [Ziyaret tarihi: 10.5.2010]
- 35 ISHIWATA, Y. ve SAITOH, M., 1999, Influence of High-Temperature Protective Coatings on the Mechanical Properties of Nickel Based Superalloys, *Journal of Metarial Science*, 34: 3957-3966
- 36 ASM Handbook 5, 2000, *Surface Cleaning*.
- 37 SMITH, A., 2002, *Advantageous of Plasma Spray Process*, Plasma Processing, Vol 5, 56-64
- 38 DING, C., TONG. Z. VE YAN, D., 1993, Properties And Application Of Plasma Sprayed Ceramic Coatings, Shangai Institue Of Ceramics, *Plasma Spray Technology and Applications*, Singapore.
- 39 DESHMUKH, S.P., MISHRA, R.S., KENDIG, K.L., 2004, Creep Behavior and Threshold Stress of an Extruded Al-6Mg-2Sc-1Zr Alloy, *Materials Science and Engineering A* 381, 381-385
- 40 CADEK J., ZHU, S. J. and MILICA, K., 2004, Creep Behaviour and Threashold Stress of an Al-6Mg-2Sc-1Zr Alloy, *Materials Science and Engineering A*, 381-385

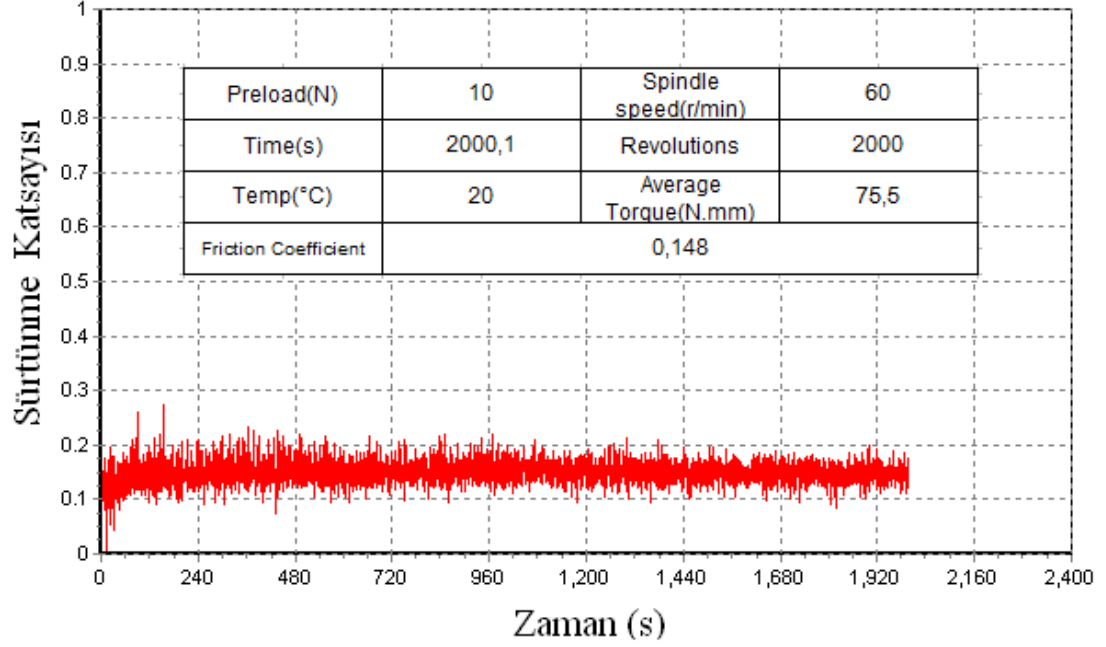
EKLER



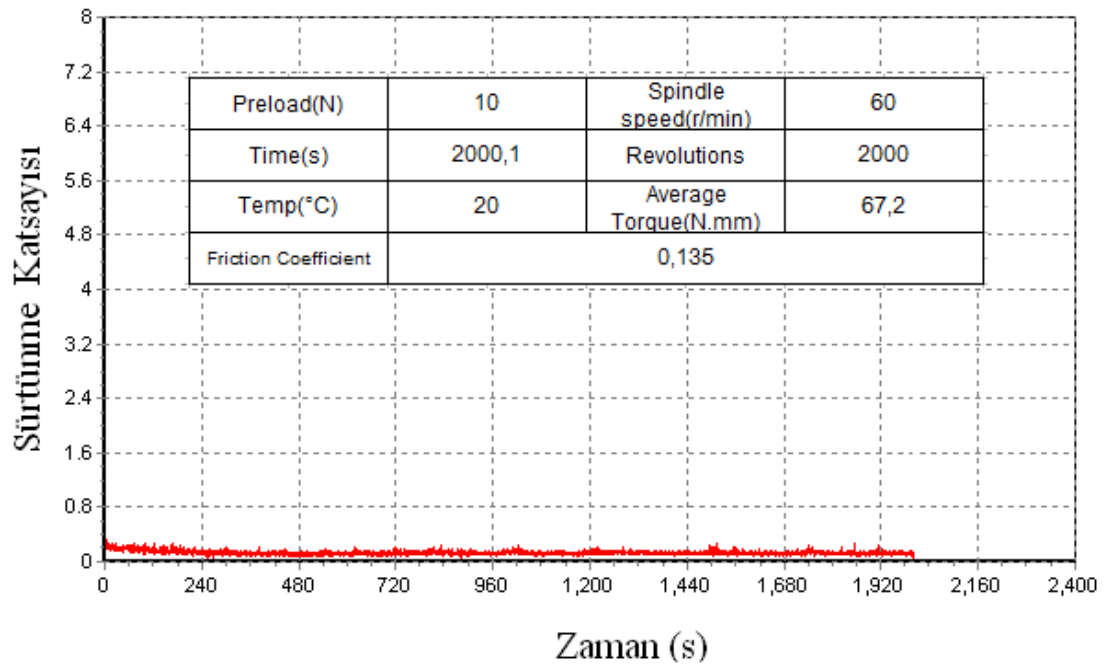
Şekil Ek 1: Kaplanmış 6063 Alüminyum alaşıminın 1000 tur 10 N yük ve 60 tur/dk‘daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



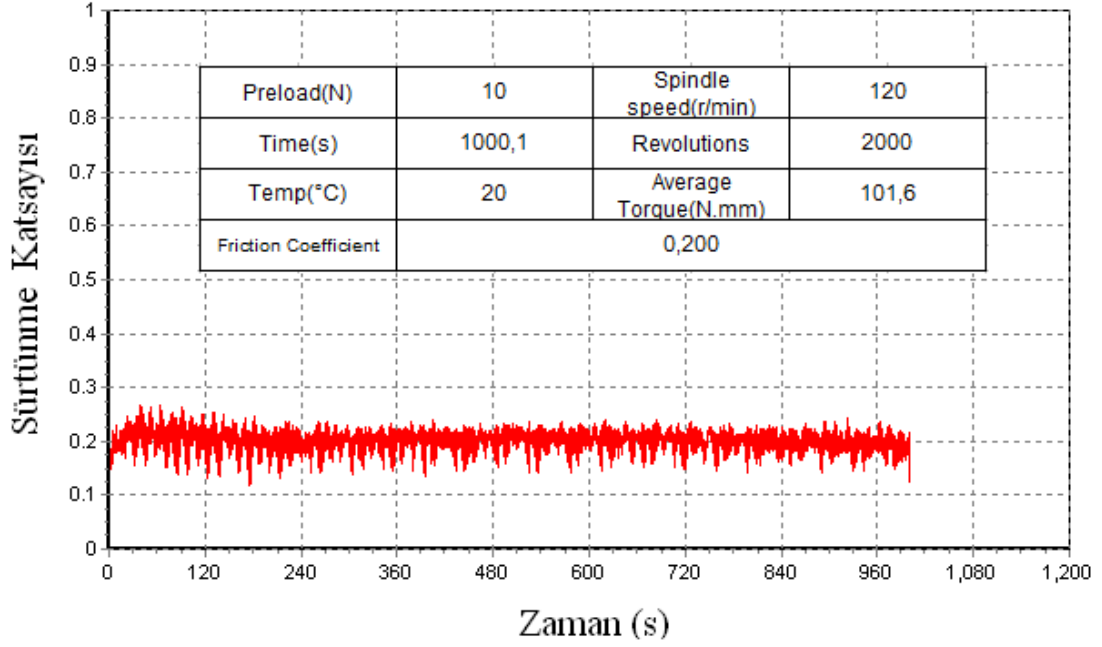
Şekil Ek 2: Kaplanmamış 6063 Alüminyum alaşımlarının 1000 tur 10 N yük ve 60 tur/dk‘daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



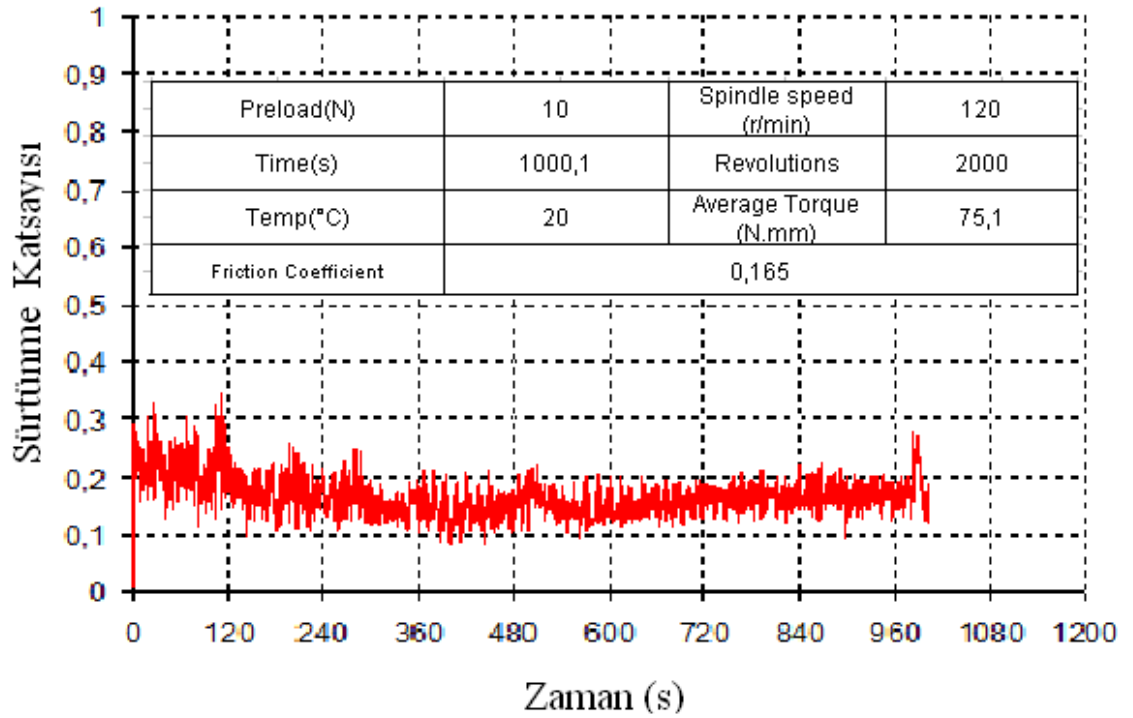
Şekil Ek 3: Kaplanmış 6063 Alüminyum alaşımlarının 2000 tur 10 N yük ve 60 tur/dk‘daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



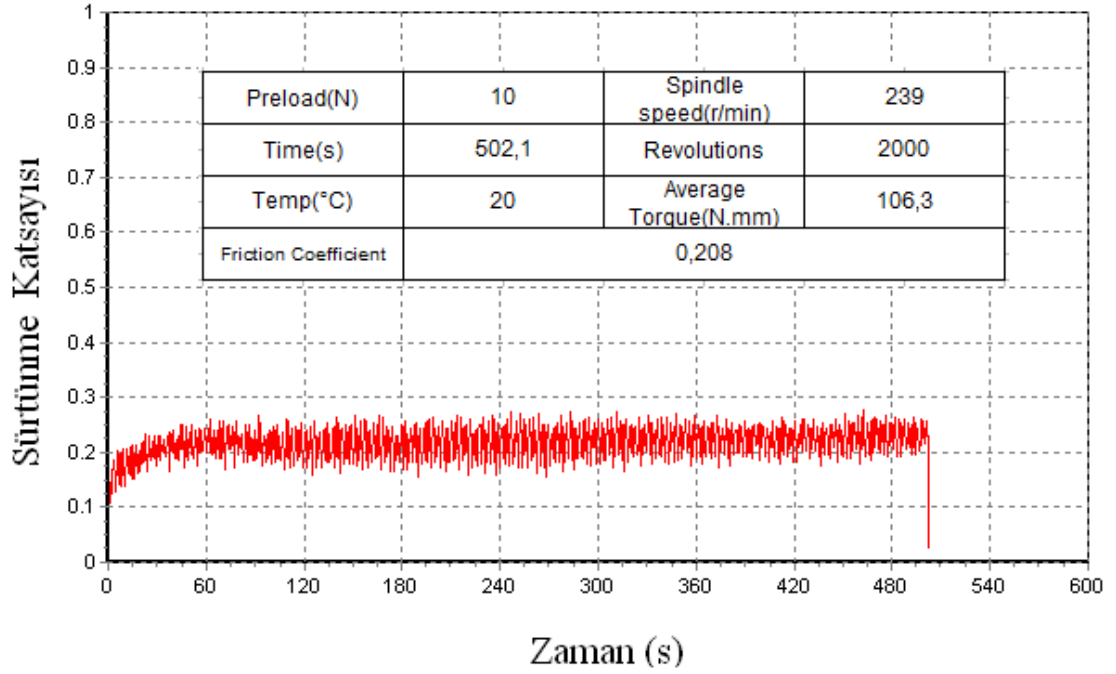
Şekil Ek 4: Kaplanmamış 6063 Alüminyum alaşımlarının 2000 tur 10 N yük ve 60 tur/dk‘daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



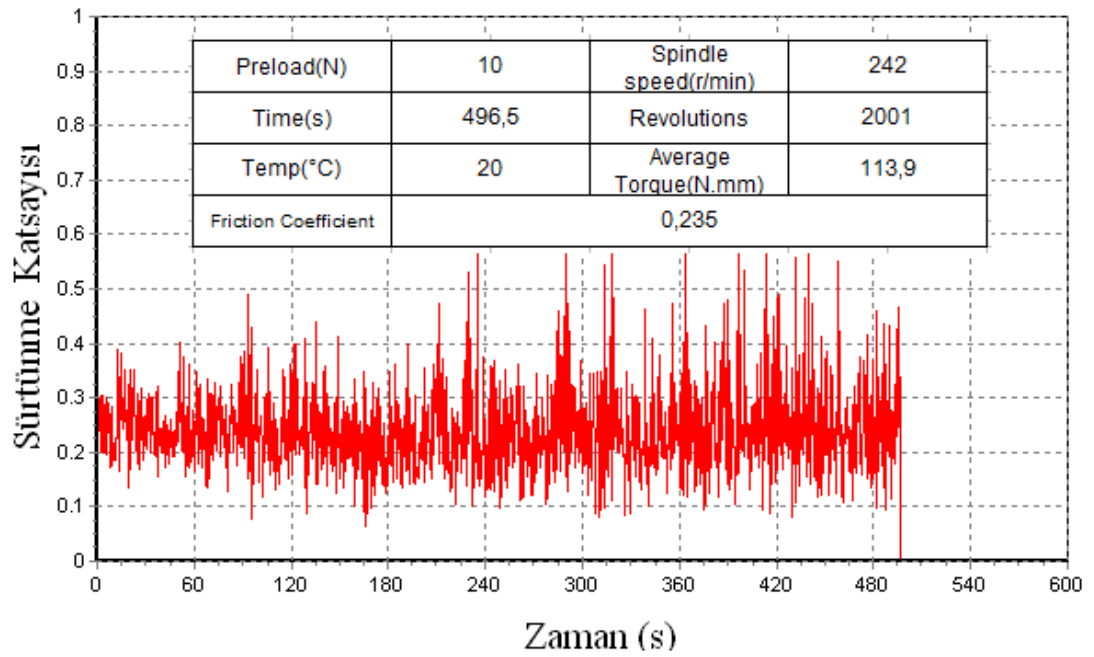
Şekil Ek 5: Kaplanmış 6063 Alüminyum alaşımlarının 2000 tur 10 N yük ve 120 tur/dk‘daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



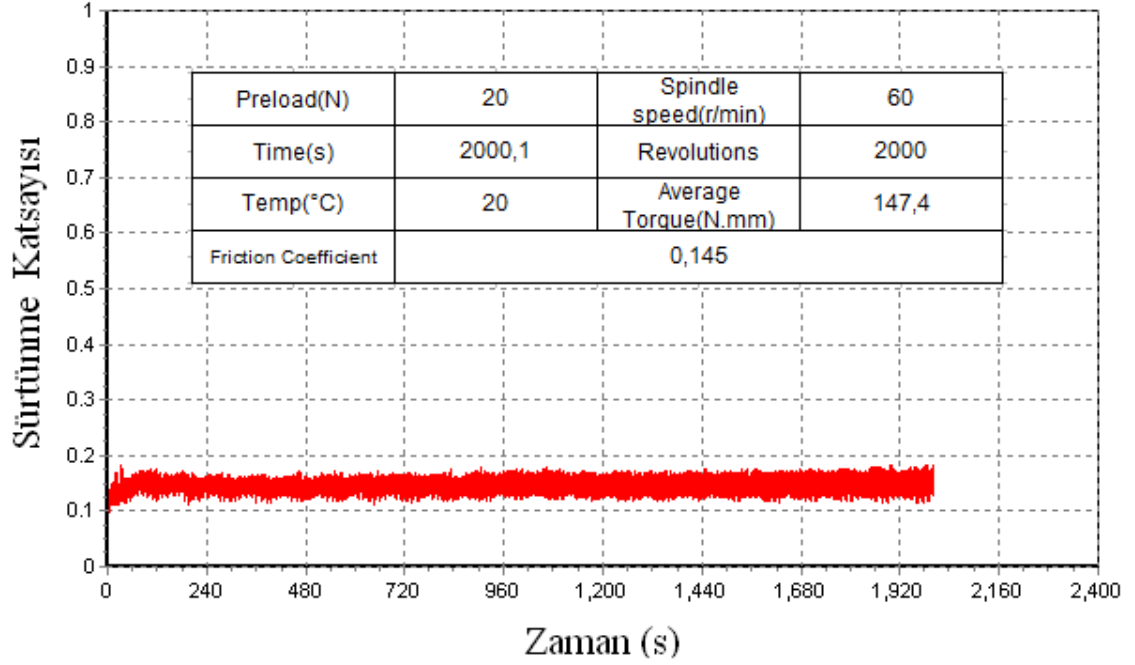
Şekil Ek 6: Kaplanmamış 6063 Alüminyum alaşımının 2000 tur 10 N yük ve 120 tur/dk' daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



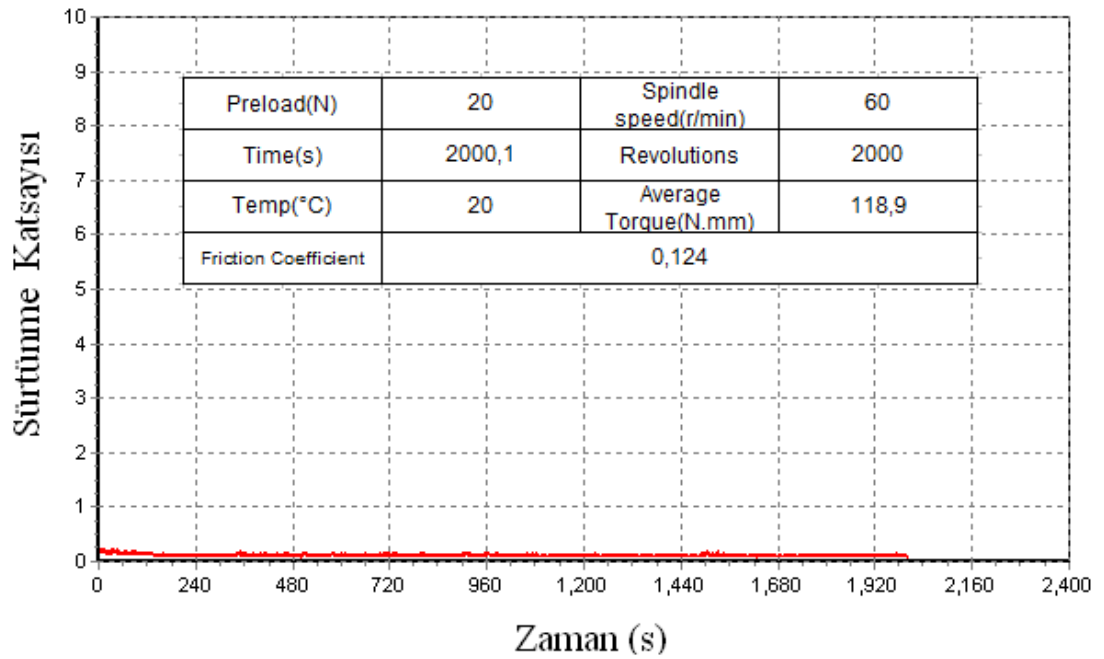
Şekil Ek 7: Kaplanmış 6063 Alüminyum alaşımının 2000 tur 10 N yük ve 240 tur/dk' daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



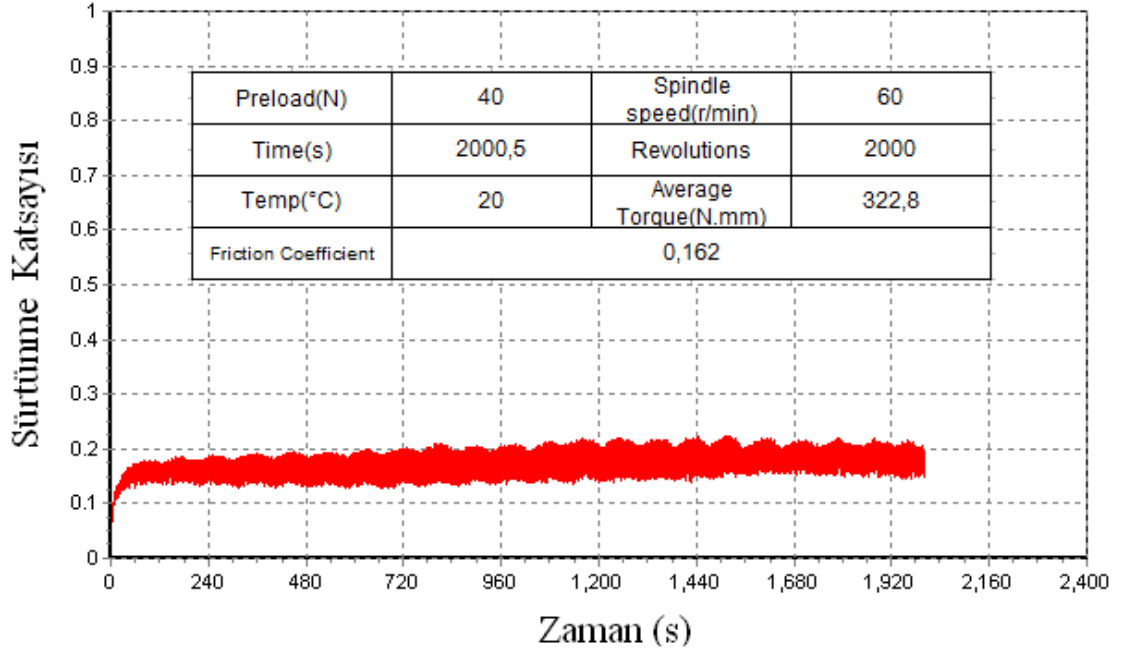
Şekil Ek 8: Kaplanmamış 6063 Alüminyum alaşımlarının 2000 tur 10 N yük ve 240 tur/dk' daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



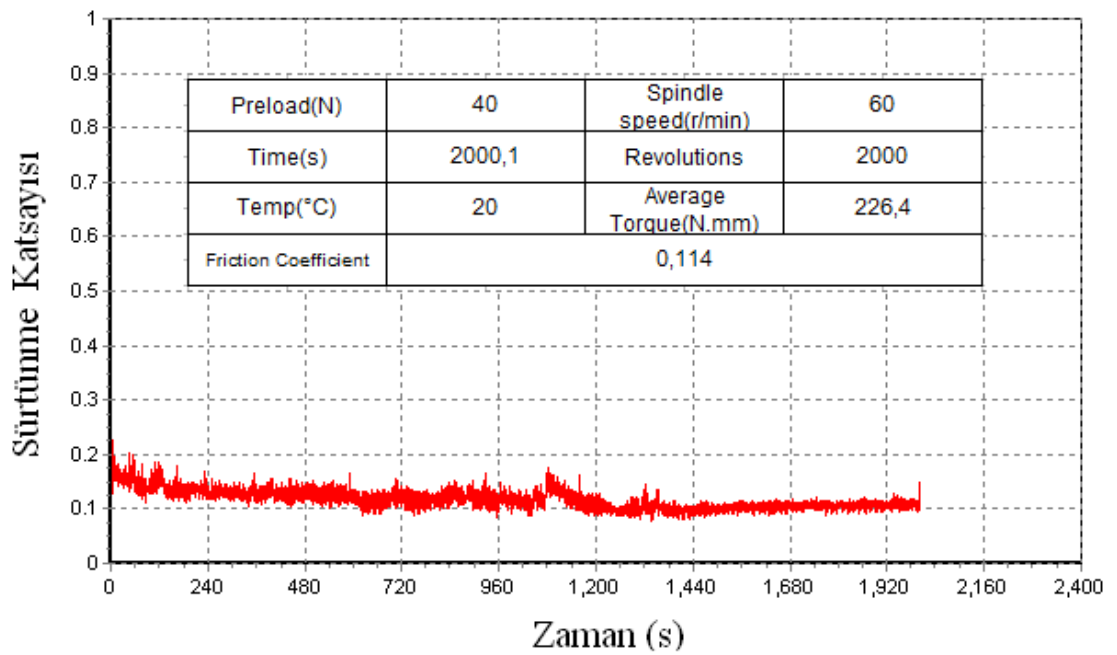
Şekil Ek 9: Kaplanmış 6063 Alüminyum alaşımlarının 2000 tur 20 N yük ve 60 tur/dk' daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



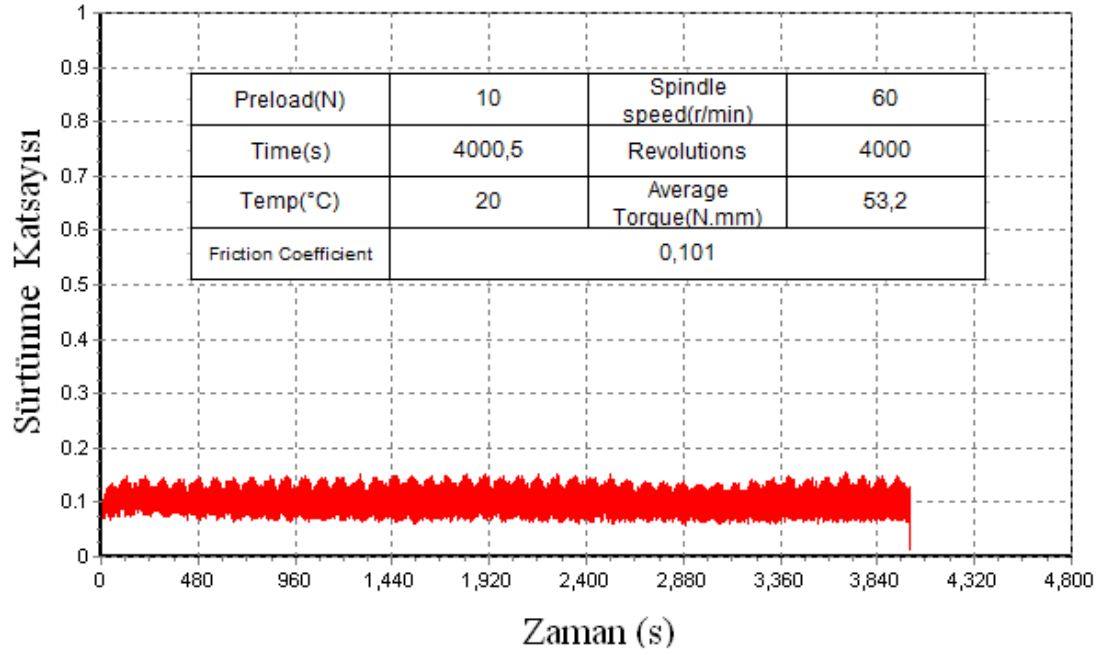
Şekil Ek 10: Kaplanmamış 6063 Alüminyum alaşımının 2000 tur 20 N yük ve 60 tur/dk' daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



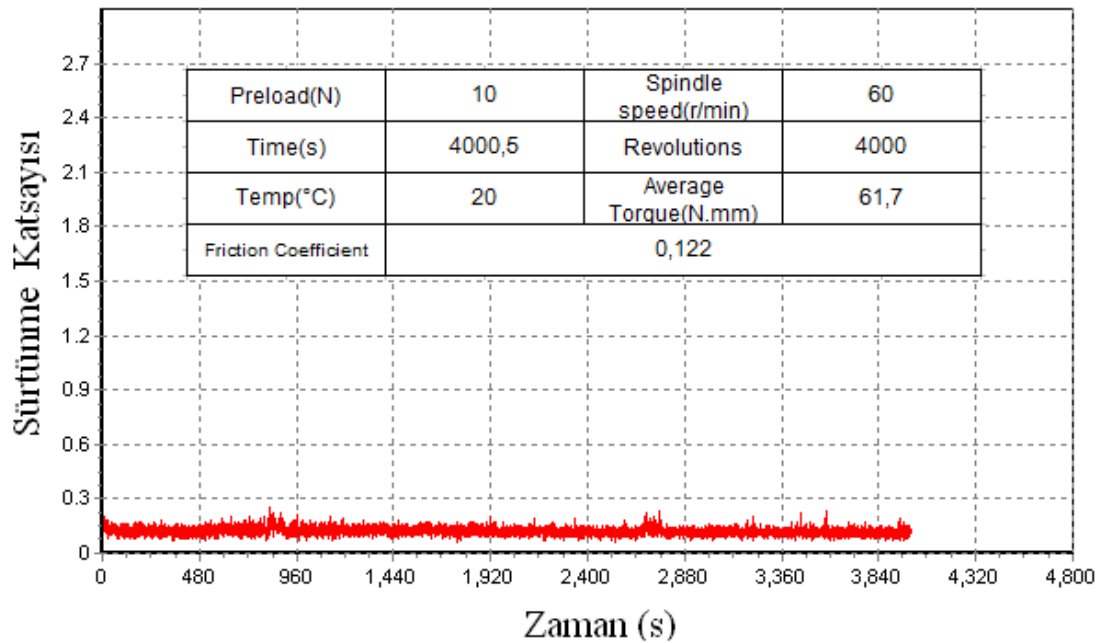
Şekil Ek 11: Kaplanmış 6063 Alüminyum alaşımının 2000 tur 40 N yük ve 60 tur/dk' daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



Şekil Ek 12: Kaplanmamış 6063 Aluminyum alaşımının 2000 tur 40 N yük ve 60 tur/dk‘daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



Şekil Ek 13: Kaplanmış 6063 Aluminyum alaşımının 4000 tur 10 N yük ve 60 tur/dk‘daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.



Şekil Ek 14: Kaplanmamış 6063 Alüminyum alaşımının 4000 tur 10 N yük ve 60 tur/dk' daki sürtünme katsayısının zamana bağlı grafiği.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Muğla' da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Kocaeli' de tamamladıktan sonra 1997 yılında İstanbul Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne girmiştir. 2001 yılında Metalurji Mühendisi olarak mezun olmuş, aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Mühendisliği A.B.D.' nda yüksek öğrenimine başlamıştır. 2003 senesinde Yüksek lisans programını tamamlayıp aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Müh. A.B.D.'nda doktora öğrenimine başlamıştır. Halen 2001 yılında girmiş olduğu İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü kadrosunda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.