



# Farklı Bağ Kaplama Uygulamalarının Yüksek Sıcaklık ve Katı Partikül Erozyon Aşınmasına Etkisi

Musa Demirci<sup>1\*</sup>, Mehmet Bağcı<sup>2</sup>

## ÖZ

Inconel 718 altlık malzeme üzerine iki farklı bağ kaplama (NiCrAlY ve NiCoCrAlY), Atmosferik Plazma Sprey (APS) ve Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF) yöntemleri kullanılarak uygulanmıştır. Enerji dönüşüm santralleri, gaz türbinleri, jet motor kanatları vb. uygulamalarda kullanılan bağ kaplamaların yüksek sıcaklık altında partikül etkisine maruz kalmasının simüle edilmesi amaçlanmıştır. Kaplama işlemi sonunda farklı özelliklere sahip dört numune grubu oluşturulmuştur. Bu numunelerin ortam koşulları ve sıcaklık altında katı partikül erozyon aşınma davranışları incelenmiştir.

Deneylede, yüksek sıcaklık koşullarında katı partikül erozyon aşınma testlerini yapabilmek için özel olarak tasarlanmış bir test düzeneği kullanılmıştır. Deney test sıcaklığı, 21 °C ve 300 °C tercih edilmiştir. Yüzeğe çarpan partiküllerin değişken açılara sahip olabileceği varsayılarak 30°, 60° ve 90° olmak üzere üç farklı aşındırıcı partikül çarpma açısı seçilmiştir. Bu deneysel parametrelere ek olarak ~97 m/s partikül çarpma hızı ve ~400 µm boyutunda alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) aşındırıcı partiküller kullanılmıştır.

Deneyle sonuçunda iki farklı yöntemle kaplanan test numunelerinin karşılaştırmalı erozyon oranı grafikleri elde edilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır. Ayrıca test numunelerinin gözeneklilik değerleri, sertlik ve yüzey pürüzlülük ölçümlerinin detayları da erozyon direnci sonuçlarına dahil edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** APS, HVOF, yüksek sıcaklık, katı partikül erozyonu, kaplama

## The Effect of Different Overlay Coating Applications on High Temperature and Solid Particle Erosion Wear

### ABSTRACT

Two different metallic coating processes (NiCrAlY and NiCoCrAlY) were applied on Inconel 718 substrates using Atmospheric Plasma Spray and High-Speed Oxy Fuel Spray methods. Energy conversion plants, gas turbines, jet engine blades, etc. It was aimed to simulate exposure to particle impact under high temperature in applications. At the end of the coating process, four sample groups with different properties were deposited. Solid particle erosion wear behavior of these samples under ambient conditions and temperature were investigated.

A specially designed test rig that can perform solid particle erosion wear tests under high temperature conditions was used in the experiments. In the experiments, 300°C was preferred as the air temperature. Assuming that the particles impacting the surface may have variable direction, three different erosive particle impingement angles were selected as 30°, 60° and 90°. In addition to these experimental parameters, particle impact velocity of ~97 m/s using the double disk method and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> erosive with a size of ~400 µm were determined.

As a result of the experiments, the comparative erosion rate graphs of the test samples coated with two different methods were obtained and the results were interpreted by using the SEM, XRD and EDX elemental analyses. In addition, the details of the porosity values of the coatings, hardness and surface roughness measurements of the test specimens were also included in the results of erosion resistance.

**Keywords:** APS, HVOF, high temperature, solid particle erosion, coating

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 18.10.2021

Kabul/Accepted : 03.01.2022

<sup>1</sup> KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya  
musa.demirci@karatay.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4159-2378

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya  
mabagci@ktun.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6934-8660



## EXTENDED ABSTRACT

### 1. Introduction

Metal alloys used in high temperature applications such as gas turbines and coal power plants are coated with different coatings in order to increase their hot corrosion and oxidation resistance. The coating named MCrAlY (M = Ni and/or Co), which is widely used among these coatings, is called bond coating in an independent single layer or thermal barrier coating (TBK) system. These coatings are one of the most widely applied protective coatings in aerospace and power plants where gas turbines are used, due to their outstanding thermo-fatigue property as well as oxidation and hot corrosion resistance. Due to the nature of gas turbines, the particles in the form of ash, which are concentrated in the fuel burning in the combustion chamber, cause the coatings used in these industries to be exposed to erosion wear. This causes erosion of the oxide layer on the bond coatings used to protect the substrate material from oxidation. This increases oxidation and corrosion in the metallic substrate, making it more vulnerable to erosion.

In this experimental study, two different bond coating powders with NiCrAlY and NiCoCrAlY properties were used on the substrate material, and test samples were produced with the effect of APS and HVOF methods. Surface roughness and porosity values of the test samples were measured, and hardness data were obtained. High temperature solid particle in 400  $\mu\text{m}$  Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) erodent effect and impact velocity  $\sim 97$  m/s by prioritizing the impact angle variability ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ ), temperature difference ( $21^\circ\text{C}$  and  $300^\circ\text{C}$ ) erosion wear tests were carried out and the results were interpreted.

### 2. Materials and Methods

In this experimental study, Inconel 718 super alloy material was chosen as the substrate material. Two different NiCrAlY and NiCoCrAlY bond coating powders were coated on the Inconel 718 substrate, using APS and HVOF methods, in total four different samples were coated.

Erosion wear tests were carried out in a test device conforming to ASTM G211-14 standard. In the experiments, alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) erosive particles with angular geometry were used as erosive particles. The erosive particle impact velocity was set at  $\sim 97$  m/s so that it would be the same in all samples and only allow the coating to wear off. In order to find the erosion wear rate according to the erodent impact angle of the coating samples produced by different methods, the experiments were carried out at three impact angles ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ ). Before and after the experiment, the erosion rates were found according to the weight of the erosive particles used by measuring the weights of the samples by means of a precision balance with  $\pm 0.1$  mg sensitivity.

Before high temperature solid particle tests are carried out, the most important parameter that can directly affect the wear resistance of the samples is the surface hardness value. Hardness measurements of the test specimens were made with a Rockwell hardness measuring device. These measurements were made according to the HR 15N measurement method and ASTM E18-12 standard in terms of international standards.

The surface roughness value, which is an important surface parameter affecting the erosion resistance, was measured with the Mitutoyo Sufstest 402 test device.

In the coatings coated on the substrate surface, porosities occur due to the coating method. The porosity values of the coatings were measured by a method called "Mercury Porosimetry" (Micromeritics).

### 3. Results and Discussion

When the Rockwell hardness measurements of four test sample groups were examined, it was seen that the hardness values of the samples coated with the APS method were less than the samples coated with HVOF. When the surface roughness measurement results were examined, no significant difference was observed between the APS and HVOF methods in the same coating powders. When the detailed porosity values of the test sample groups were examined, it was seen that in general all the coating samples create more total porosity at low pore diameter.

As a result of the solid particle erosion wear tests carried out at room temperature, it was seen that the erosion rates of almost all coating samples decrease with increasing particle impact angle. Knowing that the powders (NiCrAlY and NiCoCrAlY) used in the bond coating structure have metallic properties, the maximum erosion rate of these coatings at low impact angles indicates ductile material properties in accordance with the literature.



When the erosion resistance of the experimental sample groups against temperature changes was examined, it was observed that the erosion resistance increased with increasing temperature. As a result of this increase in temperature creating an elastic form on the surface, the erosive particles hitting the surface have an incubation effect and have an increasing effect on erosion resistance as they act as protection against the next impacting particles.

As a result of the experiments carried out at high temperature (300 °C) and at all impact angles (30, 60 and 90°), NiCoCrAlY bond coatings coated with the APS method exhibited the highest erosion rate at 30 ° impact angle.

#### **4. Conclusion**

In the case of brittle materials with the highest impact at the 90° impact angle encountered in the erosion wear rate, the opposite result has emerged, and the erosion resistance at small angles (15-45°) is at the minimum level.

The bond coatings coated with the APS method showed the most erosion wear compared to the bond coatings coated with the HVOF method.

The bond coatings coated with the HVOF method changed more against the temperature change, whereas the bond coatings produced by the APS method changed more against the angular change.

It has been determined that not only the hardness value will be decisive in determining the erosion rate in coating materials, but it may be dominant in values such as porosity and surface roughness.

As a result, the erosion rate was significantly affected by the material properties, as well as the coating method, angular and temperature changes. This indicates that estimating the erosion rate of coated materials is more complex.

## 1. GİRİŞ

Gaz türbinleri ve kömür santralleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarına ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılan metal alaşımlarının sıcak korozyon ve oksidasyon dirençlerinin artırılması amacı ile farklı kaplamalar ile kaplanırlar. Bu durum zamanla farklı kaplama türlerinin (difüzyon kaplamaları, MCrAlY bağ kaplamaları, modifiye difüzyon kaplamaları ve en son olarak termal bariyer kaplamaları) gelişmesini beraberinde getirmiştir [1]. Bu kaplamalardan yaygın olarak kullanılan MCrAlY isimli kaplama (M = Ni ve/veya Co), bağımsız tek katmanlı veya termal bariyer kaplama (TBK) sistemlerinde bağ kaplama olarak tercih edilmektedir. Optimum seviyede termo-yorulma özelliğine ilave olarak oksidasyon ve sıcak korozyon direnci sağlanmasıyla gaz türbinlerinin kullanıldığı havacılık ve enerji santrallerinde yaygın olarak uygulanan koruyucu kaplamalardan biridir [2-4]. MCrAlY kaplamaları genellikle altlık malzeme üzerine; Atmosferik Plazma Sprey (APS), Vakum Plazma Sprey (VPS), Soğuk Gaz-Dinamik Sprey (CGDS) ve Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF) gibi termal spre yöntemleri ile kaplanırlar. Bu kaplama yöntemleri bağ kaplamaların ömrünü önemli oranda etkilemektedir. Bağ kaplamaların kaplamasında en yaygın olarak APS ve HVOF yöntemleri kullanılır. Bunun nedeni bu yöntemlerin ekonomik ve endüstriyel olarak yaygın olmalarıdır [5].

Gaz türbinlerinin doğası gereği yanma odasında yanan yakıtın içinde yoğun olarak bulunan kül şeklindeki partiküller yüksek sıcaklığın ihtiyaç olduğu sektörel kullanıma yönelik endüstrilerde oluşturulan kaplamalar erozyon aşınmasına maruz kalabilirler [6, 7]. Bu durum altlık malzemeyi oksidasyondan korumak için kullanılan bağ kaplamalar üzerindeki oksit tabakasının aşınmasına sebep olur. Bu da metalik altlık malzemede oksidasyon ve korozyonu artırarak altlık malzemeyi erozyona karşı daha korumasız hale getirir. Erozyon olayı başlangıçta altlık malzeme üzerinde önemli bir etki oluşturmamakla birlikte kaplama malzemesindeki aşınmayla birlikte ana metal malzemenin aşınmasını hızlandırır [8].

Literatürde erozyon aşınması üzerine çalışan ve gaz türbinlerindeki etkisini inceleyen farklı çalışmalar vardır. Tabakoff ve ark. yaptıkları çalışmada gaz türbinlerinde en fazla erozyon aşınmasının türbin giriş kısmında olduğunu tespit etmişlerdir [9]. Havada serbest bir şekilde dolaşan partiküller türbin giriş kısmından girerek burada bulunan malzemelerde aşınmaya sebep oldukları gibi türbin kompresörünün emme ve basma kısımlarında da aşınmaya neden olmaktadır. Hamed ve ark. tarafından yapılan bir başka çalışmada kumlu ortamda çalışan türbin kompresöründe meydana gelen katı partikül aşınmasını incelemişlerdir [10]. Bolelli ve ark. yaptıkları çalışmada vakum plazma yöntemi ile ürettikleri alüminyum oksit emdirmeye ile güçlendirilmiş bağ kaplamaların aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda bu bağ kaplamaların aşınma direncinin arttığını sonucuna varmışlardır [11].

Yapılan bu deneysel çalışmada altlık malzemesi olarak uzay havacılık uygulamaların-



da tercih edilen Inconel 718 seçilmiş olup kaplama uygulaması olarak APS ve HVOF yöntemleri uygulanmıştır. NiCrAlY ve NiCoCrAlY özellikte iki farklı bağ kaplama tozu kullanılarak APS ve HVOF yöntemleri etkisiyle deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu dört farklı deney numunesinin birbirlerine olan üstünlüklerini belirlemek amacıyla yüzey pürüzlülük ve gözeneklilik değerleri ölçülmüş olup sertlik verileri elde edilmiştir. Mekanik özelliklere ait farklılıklar belirlendikten sonra çarpma açısı değişkenliği (30°, 60° ve 90°), sıcaklık farklılığı (21 °C ve 300 °C) önceliklendirilerek yaklaşık 400 µm erozif aşındırıcı partikül etkisinde ve çarpma hızının da ~97 m/s olduğu durumda yüksek sıcaklık katı partikül erozyon aşınma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara bağlı olarak erozyon oranını belirlemek amacıyla sıcaklık özelinde çarpma açısı, aşındırıcı partikül boyutu ve çarpma hızı değişkenliklerine ait grafikler elde edilerek 1 farklılıklar yorumlanmıştır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1 Malzeme

Bu deneysel çalışmada Inconel 718 süper alaşım malzemesi altlık malzeme olarak seçilmiştir. Alloy 718 adıyla da anılan altlık malzeme nikel alaşımları arasında korozyon direncinden dolayı yaygın olarak kullanılır. Inconel 718 malzeme çok yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilme yetkinliğine sahip olmakla birlikte yaşlandırılarak çökertildikten sonra sertliği önemli oranda artabilmektedir [12]. Inconel 718'in farklı sıcaklık değerlerine karşılık gelen mukavemet değerlerindeki değişim Tablo 1'de halinde verilmiştir.

Literatürde altlık malzeme üzerine bağ kaplama uygulamalarında APS, HVOF, VPS ve CGDS gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmakta olup [14] bu bağ kaplama metodlarının partikül hızı ve işlem sıcaklıklarına göre karşılaştırmaları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Inconel 718'in Sıcaklık ile Mukavemet Değerlerindeki Değişime [13]

Sıcaklık (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
21	1450	1206	22
200	1365	1123	20
425	1316	1075	19
540	1275	1068	18
650	1158	1027	19
760	765	758	27

**Tablo 2.** Farklı Bağ Kaplama Uygulamasına Bağlı Olarak Partikül Hızı - İşlem Sıcaklık Karşılaştırması [15]

Metot	Partikül hızı (m/s)	İşlem sıcaklığı (°C)
APS	200 – 300	15000
HVOF	700 – 800	2500 – 3000
VPS	200 – 300	15000
CGDS	800 – 900	800 – 900

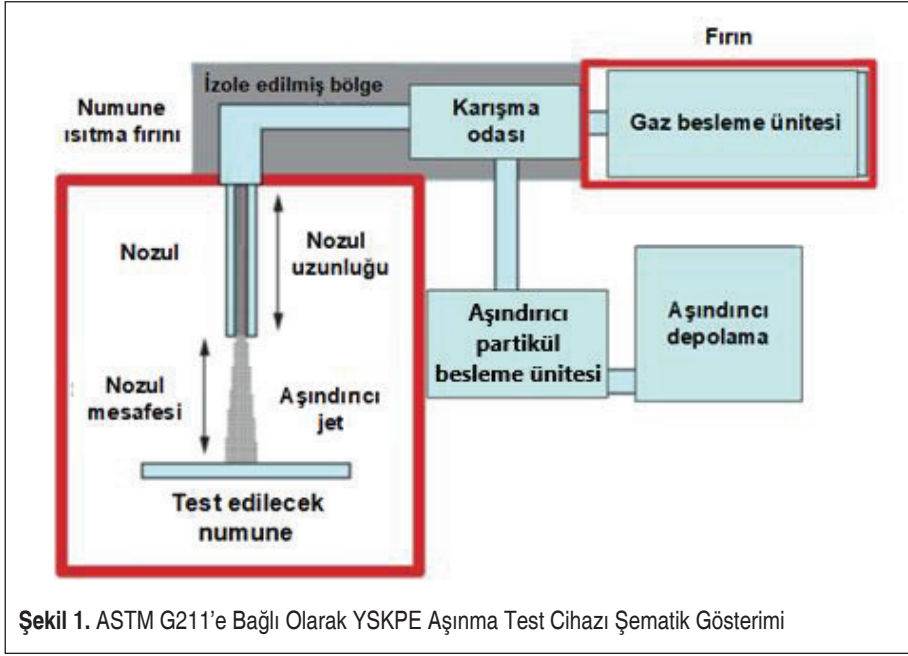
Termal sprey yöntemi, bir kaplama oluşturmak için metalik ve metalik olmayan malzemelerin erimiş/yarı erimiş durumda veya hatta tamamen katı halde ince parçacıklar halinde altlık malzeme üzerine püskürtüldüğü bir grup kaplama işlemini içerir. Termal sprey kaplamanın en büyük avantajı yüzeye kaplanacak çeşitli malzemelerin (toz, tel, çubuk veya çözelti şeklinde olabilir) bir ısı kaynağı vasıtasıyla ergitilerek altlık malzeme katı yüzeyine belirli bir hızda püskürtülerek biriktirilmesidir [16]. Genel olarak altlık malzeme yüzeyinde gerilme olmayacak şekilde yani çarpılmaya neden olmayan kaplama malzemeleri sprey malzemesi olarak kullanılabilir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, belirli bir çap genişliğine sahip sprey tabancasından çıkan eriyik veya yarı eriyik kaplama malzemesinin altlık malzeme ile mesafesinden kaynaklı olarak yüzeyde tam üniform bir dağılımı gösterememesidir.

Farklı kaplama metotlarının (APS ve HVOF) Inconel 718 altlık malzeme üzerine iki farklı NiCrAlY ve NiCoCrAlY bağ kaplama tozlarının etkinliğinde toplam dört farklı numune elde edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

## 2.2 Yüksek Sıcaklık Katı Partikül Erozyon (YSKPE) Deneyi

Erozyon aşınma testleri ASTM G211-14 standardına [17] uyumlu olan Şekil 1’de şematik gösterimi verilen test cihazında yürütülmüştür. Şematik gösterimde görüldüğü gibi malzeme yüzeyini aşındıracak partiküllerin taşınmasını sağlayan gaz, besleme ünitesinde bir fırın yardımı ile istenilen sıcaklıklara kadar ısıtılmakta ve bir ısı ölçer yardımı ile sıcaklık kontrolü yapılabilmektedir. Isıtılan hava izole bir bölgeden geçerken sıcak hava içine aşındırıcı partikül beslemesi yapılarak aşındırıcı jet oluşturulmakta ve malzeme yüzeyine nozul mesafesi ayarlanarak istenilen açıda aşındırıcı partiküller püskürtülmektedir. Bu durum sayesinde malzeme yüzeyinde erozyon aşınması oluşturulmaktadır.

Deneylerde aşındırıcı partikül olarak literatürde yaygın bir kullanımı olan açısız geometriye sahip alümina ( $Al_2O_3$ ) aşındırıcı partikülleri kullanılmıştır [18, 19]. Deneyler yüksek sıcaklıklarda da yapıldığı için bu sıcaklıklarda kararlılığını ve sertliğini



koruyabilmesi alümina aşındırıcısı seçilmesinde diğer bir faktör olmuştur. Aşındırıcı partikül çarpma hızı bütün numunelerde aynı olacak ve sadece kaplamanın aşınmasını sağlayacak şekilde ~97 m/s olarak ayarlanmıştır. Partikül çarpma hızının belirlenmesinde literatürde ekonomik ve kolay uygulanabilir olmasından dolayı tercih edilen çift disk metodu kullanılmıştır. Farklı metotlar ile üretilmiş kaplama numunelerinin erozif aşındırıcı çarpma açısına göre erozyon aşınma oranını bulmak amacıyla deneyler üç çarpma açısında (30, 60 ve 90°) gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi ve sonrasında numuneler,  $\pm 0,1$  mg hassasiyete sahip hassas terazi vasıtasıyla ağırlıkları ölçülerek kullanılan aşındırıcı partikül ağırlığına göre erozyon oranları bulunmuştur.

Erozyonun doğrusal değiştiği durum göz önüne alınarak erozyon oranı (ER) değeri denklem 1 formülü ile hesaplanır. Formülde hesaplanan erozyon oranının birimi mg/g'dir. Deneyler sonrasında numunelerde meydana gelen kütle kaybını ( $\Delta W$ ) belirlemek amacıyla hassas terazi kullanılarak mg cinsinden sonuca ulaşılmaktadır. Kaplanmış yüzeye etki eden erozif aşındırıcı kütlesi ise ( $m$ ) sembolüyle ifade edilerek formülde  $g$  olarak belirlenmektedir.

$$ER = \frac{\text{aşınan malzemenin kütle kaybı } (\Delta W)}{\text{aşındırıcı partikül kütlesi } (m)} \quad (\text{Denklem 1})$$

Deneyler aynı numune grubunun içindeki numunelerde aynı deney koşullarında tek-

**Tablo 3.** Deney Parametreleri

Erozyon Deneyi Parametreleri	NiCrAlY / NiCoCrAlY
Co oranı (% ağırlık)	0 / 20
Aşındırıcı partikül	Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Aşındırıcı partikül boyutu (µm)	~400
Aşındırıcı partikül şekli	Açısal
Aşındırıcı partikül ağırlığı (g)	100
Test açıları (°)	30, 60 ve 90
Aşındırıcı partikül çarpma hızı (m/s)	~97
Nozul çapı (mm)	5

rarlı bir şekilde yürütülerek erozyon oranı değerlerinin ortalaması ve standart sapması hesaplanarak erozyon oranı grafikleri hata payının da gösterildiği şekilde oluşturulmuştur. Aşınmanın sadece bağ kaplamada kalması sağlanıp altlık malzemeye ulaşmaması amacıyla farklı aşındırıcı partikül ağırlıklarında ön deneyler yapılarak deneylerde kullanılacak aşındırıcı partikül ağırlığı bütün numunelerde 100 g olarak belirlenmiştir. Tablo 3'te YSKPE deneylerinin yapıldığı bütün deney parametreleri verilmiştir.

### 2.3 Mekanik Özellikler

Yüksek sıcaklık katı partikül deneyleri yapılmadan önce numunelerin aşınma dirençlerini doğrudan etkileyebilecek bazı mekanik özellikleri numuneler arası karşılaştırma yapabilmek amacı ile önceden ölçülmüştür. Erozyon aşınmasını birinci derecede etkileyecek en önemli parametre yüzey sertlik değeridir [20]. Literatürde yaygın olarak kullanılan kolay, pratik ve ekonomik olması nedeniyle deney numunelerinin Rockwell sertlik ölçüm cihazı ile sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş olup bu ölçümler uluslararası standart açısından HR 15N ölçüm metoduna ve ASTM E18-12 standardına göre yapılmıştır [21]. Sertlik ölçümünde her bir numune grubundan üç adet numune seçilerek ve seçilen numunenin de üç farklı noktasından ölçüm yapılarak her bir numune grubu için toplamda dokuz adet ölçüm sonucunda sertlik değerlerinin ortalaması standart sapma ile birlikte hesaplanmıştır. Şekil 2'de deneylerde kullanılan sertlik cihazına ait görsel verilmiştir.

Erozyon direncine etki eden bir önemli yüzey parametresi ise yüzey pürüzlülük değeridir [22]. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo Sufest 402 test cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm öncesinde numuneler, ultrasonik etanol banyosunda 10 dakika





bekletilmiş ve daha sonra kurumaya bırakılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri farklı numune gruplarından 3'er tane numune seçilerek ortalama pürüzlülük değeri olan Ra değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Altlık malzeme yüzeyine uygulanan kaplama yöntemine bağlı olarak numunelerde gözeneklilikler meydana gelebilmektedir. Özellikle termal sprey yönteminde bu gözeneklilik oluşumu daha fazladır. Bu durum da kaplama aşınma direncini önemli oranda etkilemektedir. Bu nedenle kaplamaların gözeneklilik değerleri "Cıva Porozimetresi" (Micromeritics) isimli bir yöntem ile ölçülmüştür. Cıva porozimetresi ile kaplama yüzeyinde olan gözenekliliğin çapı ve dağılımı rahatlıkla bulunabilir. Cıva porozimetresi ile nanometre seviyesindeki gözeneklilik çaplarının ölçümü yapılabilir. Bu yöntem, malzeme yüzeyinde kim-

yasal tepkime oluşturmeyen ve numune yüzeyini ıslatmayan cıvanın yüksek yüzey gerilimi özelliğinin kullanılmasına dayanır [23]. Cıvanın yüzeydeki gözeneklere bir dış basınç olmadan nüfuz etmeme özelliğini kullanan bu yöntem ile belirli bir dış basınç (P) uygulanarak cıvanın gözeneklere nüfuz etmesi sağlanır. Gözeneklilik değerinin belirlenmesinde kullanılan dış basınç değeri, gözenek çapı (r) ile ters orantılıdır ve cıvanın yüzey gerilimi ( $\gamma$ ) ile dengelenir. Bu durum Washburn denklemi [24] ile ifade edilir: Denklemde uygulanan dış basınç (P) değeri, malzeme sabiti olan  $\gamma$  ve  $\theta$  değerleri önceden tespit edilerek gözenek çapı (r) hesaplanabilir. Bu hesabın haricinde gözenek içine nüfuz eden cıvanın hacmi ve değişen basınç değerlerini hesaba katarak gözenek çapına bağlı olarak toplam gözenek alanı ( $m^2/g$ ) bulunabilir.

### 3. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Deney numunesi altlık malzemesi olarak belirlenen Inconel 718 üzerine APS ve HVOF yöntemleri kullanılarak bağ (NiCrAlY ve NiCoCrAlY) kaplama işlemi uygulanan deney numuneleri öncelikle iki farklı sıcaklıkta (21 °C ve 300 °C) ve üç farklı çarpma açısında (30°, 60° ve 90°) erozyon oranının belirlenmesi amacıyla testleri yapılmıştır. Bu testlerin yapılmasında erozif aşındırıcının çarpma hızı ~97 m/s ayar-

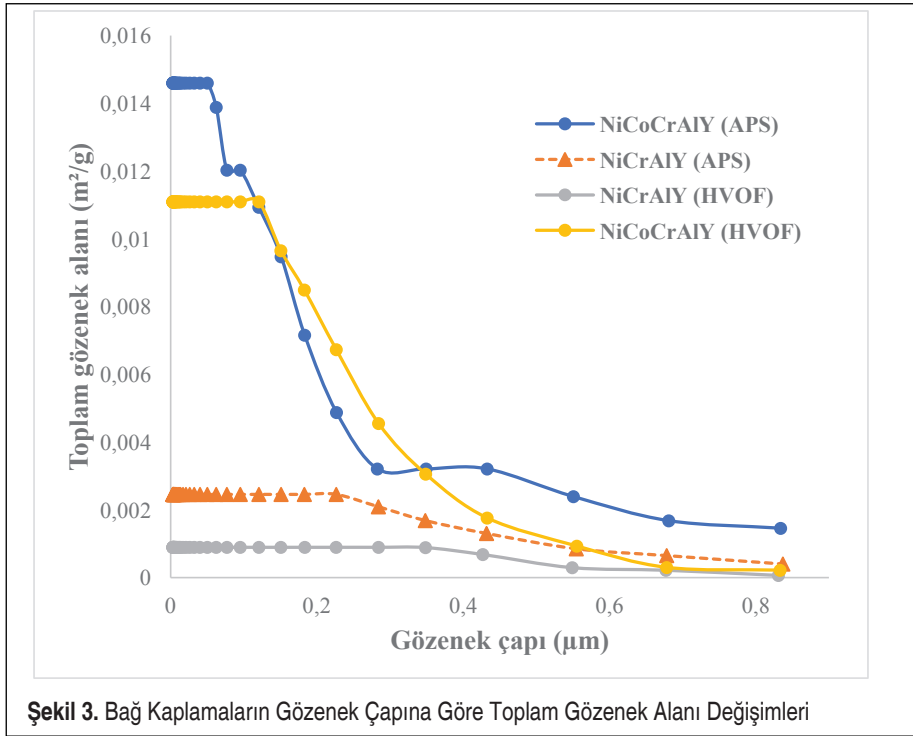
lanmış ~400 µm erozif partikül etkisinde sorgulanmıştır. Hassas terazi kullanılarak sıcaklığın erozyon aşınma deneylerinde oluşturduğu etkiyi belirlemek amacıyla deney öncesi ve sonrasına ait ağırlık değişkenlikleri ölçülmüş ve çarpma açısı–erozyon oranı grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerin hata çubuklarına ait verilerin ortaya konması amacıyla üç tekrar sonucundaki değerlere ait erozyon oranları hesaplanmış ve bu değerlerin ortalamasına ilave olarak standart sapma değerleri de hesaplanarak çarpma açısı–erozyon oranı grafikleri oluşturulmuştur.

### 3.1 Mekanik Ölçüm Sonuçları

Deney numune grupları sertlik, pürüzlülük ve gözeneklilik ölçümlerine tabi tutulmuşlar ve bu ölçümlerin sonuçları Tablo 4’te verilmiştir. Dört adet deney numune grubunun Rockwell sertlik ölçümlerine bakıldığında APS yöntemi ile kaplanan numunelerin sertlik değerlerinin HVOF ile kaplanan numunelerden daha az olduğu görülmektedir. HVOF yöntemi ile yapılan kaplamalarda, kaplama tozlarının altlık malzemeye yüksek hızda püskürtülmesinden dolayı kaplama yüzeyinde daha yoğun bir kaplama malzemesi olması beraberinde yüzey sertliğini artırıcı bir durum oluşturmuştur [16]. Aynı kaplama tozlarının farklı metotlar ile altlık malzeme yüzeyine kaplanması yüzey sertliğini değiştirici bir durum olarak ortaya çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları incelendiğinde aynı kaplama tozlarında APS ve HVOF metotları arasında belirgin bir fark görülemez. Fakat burada kullanılan kaplama tozuna göre bir fark olduğu söylenilebilir. Her iki kaplama metodu kendi içinde değerlendirildiğinde NiCrAlY bağ kaplamaları diğer numune grubuna göre daha fazla yüzey pürüzlülüğü sergilemiştir. Kaplamaların yüzde gözeneklilik değerleri incelendiğinde APS yöntemi ile kaplanan yüzeylerde daha fazla gözeneklilik oluşmuştur. Bu durum APS yönteminin daha fazla gözenekli bir yapıda kaplama oluşturduğunu göstermektedir. Kaplamaların termal bariyer özellik göstermesinin

**Tablo 4.** Kaplamaların Mekanik Özellikleri

	Ortalama sertlik (HR 15N)	Ortalama pürüzlülük değeri ( $R_a$ , µm)	Gözeneklilik (%)
NiCrAlY (APS)	68,2 ± 1,62	17,9 ± 0,33	2,336
NiCoCrAlY (APS)	65,8 ± 1,15	12,1 ± 0,35	2,774
NiCrAlY (HVOF)	77 ± 2,45	14,8 ± 0,83	1,616
NiCoCrAlY (HVOF)	78 ± 0,78	5,3 ± 0,1	2,072



istenildiği durumlarda kaplamanın gözenekli yapıda olması numune yalıtkanlığını artırıcı bir özellik olduğu için bazı durumlarda istenebilmektedir [25].

Deney numune gruplarının detaylı gözeneklilik değerlerini incelemek amacıyla oluşturulan gözenek çapına bağlı toplam gözenek alanları grafiği Şekil 3'te verilmiş olup genel olarak bütün kaplama numunelerinin düşük gözenek çapında daha fazla toplam gözeneklilik oluşturduğu belirlenmiştir.

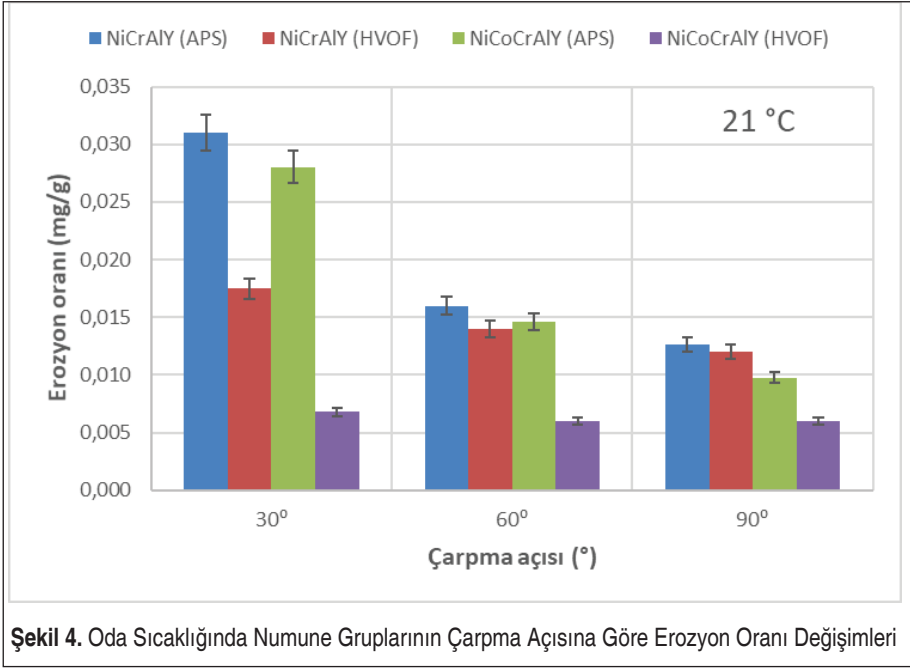
Termal sprey yöntemlerinin bir dezavantajı olan sprey tabancasından çıkan ve altlık malzeme yüzeyine doğrusal bir şekilde çarpan kaplama tozlarının kaplama yüzeyinde tam üniform dağılımı sağlayamaması da anlaşılmaktadır. Farklı gözeneklilik çaplarının kaplama yüzeyinde farklı toplam alanlar oluşturması bunun ispatıdır. Grafiğin doğrusal olarak ilerlediği yani kaplama yüzeyinde toplam gözeneklilik alanının gözenek çapına göre sabit olduğu numune grubu HVOF yöntemi ile kaplanmış NiCrAlY bağ kaplamalarıdır. Belirlenen en fazla gözeneklilik çapına göre toplam alan değişimi, APS yöntemi ile kaplanan NiCoCrAlY bağ kaplamalarında görülmüştür. Bu durum yüzde gözeneklilik değeri ile uyumlu çıkmıştır. APS ve HVOF yöntemi ile kaplanan bağ kaplamalarda en fazla gözeneklilik, NiCoCrAlY bağ kaplamalarında olduğu tespit edilmiştir. Her iki yöntemde de gözenekliliğin bu bağ kaplamalarda görülmesi

kaplama toz boyutunun büyük olması ile açıklanabilir. Ayrıca en düşük gözeneklilik çapına karşılık gelen toplam gözeneklilik alanı HVOF yöntemi ile kaplanmış NiCrAlY bağ kaplamalarında meydana gelmiştir.

### 3.2 Çarpma Açısının Erozyon Oranına Etkisi

Katı partikül erozyonunu direk etkileyen parametrelerin başında aşındırıcı partikül çarpma açısı gelmektedir. Ayrıca malzemenin katı partikül erozyon deneyleri sonucunda sünek veya gevrek malzeme olduğunun tespiti de hangi çarpma açısında maksimum erozyon aşınması olması ile doğrudan ilgilidir. Düşük partikül çarpma açılarında (15 – 30°) maksimum erozyon aşınması oluşuyorsa malzeme sünek, yüksek partikül çarpma açılarında (90°) maksimum erozyon aşınması oluşuyorsa malzeme gevrek olarak isimlendirilmektedir [20]. Düşük çarpma açılarında maksimum erozyonun olduğu sünek malzemelerde katı partikül erozyon aşınması düşük açılarda yüzeye çarpan aşındırıcı partiküllerin plastik deformasyonla yüzeyden malzeme kaldırmasıyla aşınma mekanizması meydana gelir [26]. Sünek malzemelerde yüksek çarpma açılarında aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyine gömüldükleri ve sonradan çarpan aşındırıcı partiküller yüzeye gömülen partiküllere çarparak kırıldıkları için katı partikül aşınmasının azalmasına sebep olur. Ayrıca malzeme yüzeyinde biriken aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyine gömülerek ağırlık artışına (inkübasyon) bile etki oluşturabilir [27].

Kaplama malzemelerinin erozyon davranışı incelendiği zaman uygulanan kaplama yöntemine göre altlık malzeme yüzeyinde ayrı tabakalara sahip farklı katmanlar elde edilir. APS ve HVOF yöntemlerine bağlı olarak kaplamanın farklı aşınma modelleri gerçekleştireceği aşikâr olup deneysel çalışmada modellerin karşılaştırması yapılmıştır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen katı partikül erozyon aşınma deneyleri sonucunda farklı açılarda meydana gelen erozyon oranı değerlerini ve hata paylarını da gösterecek şekilde sütun grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Grafik incelendiği zaman hemen hemen tüm kaplama numunelerinin artan partikül çarpma açısı ile erozyon oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Bağ kaplama yapısında kullanılan tozların (NiCrAlY ve NiCoCrAlY) metalik özellikte olduğu bilgisi dahilinde bu kaplamaların düşük çarpma açılarında maksimum erozyon oranı sergilemeleri literatürle uyumlu olarak sünek malzeme özelliğini gösterdiği belirlenmiştir [28, 29]. Aynı kimyasal yapıda bağ kaplamaya sahip fakat farklı metot ile üretilen numuneler incelendiğinde APS yöntemi ile kaplanan NiCrAlY bağ kaplama numuneleri, HVOF yöntemi ile kaplanan aynı bağ kaplamalardan bütün çarpma açılarında daha fazla erozyon oranı sergilemiştir. Benzer durum APS yöntemi ile kaplanan NiCoCrAlY bağ kaplama numunelerinde de görülmektedir. Bu durum göstermiştir ki APS yöntemi ile kaplanan numunelerin artan gözeneklilik değerleri ile hem sertlikleri hem de erozyon dirençleri daha düşük çıkmıştır. Literatürde de Shin ve Hamed [30], APS yöntemi ile üretilen ağırlıkça %7 oranına sahip İtiryum Oksit ile stabilize edilmiş Zirkona (YSZ) termal bariyer kaplamalarının

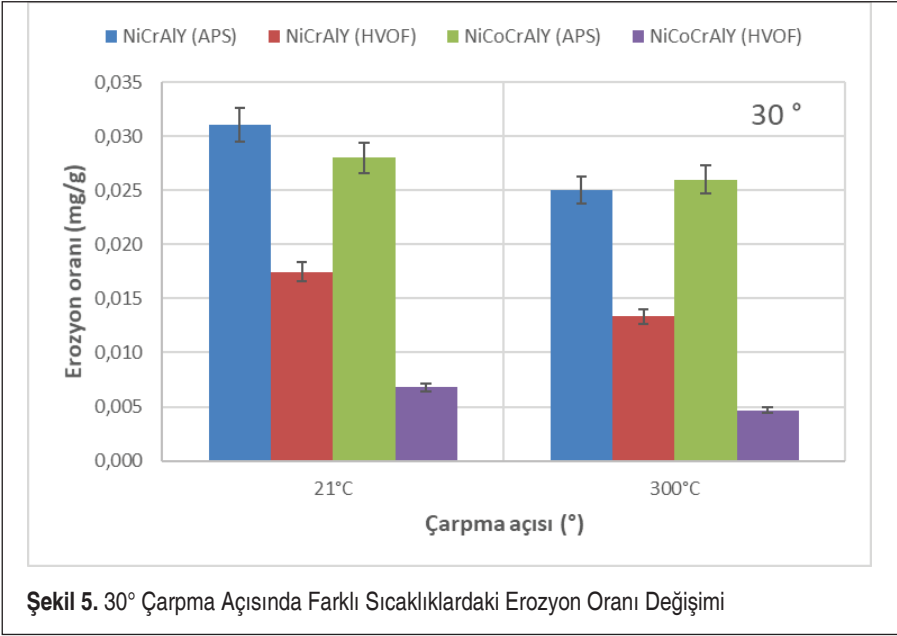


(TBK) erozyon oranına mikro yapının etkisini inceledikleri çalışmada gözeneklilik yüzdesinin artmasıyla erozyon oranının arttığını belirlemişlerdir.

Aynı yöntem ile üretilen fakat farklı içeriğe sahip bağ kaplamaların kendi içinde karşılaştırılması yapıldığında her iki kaplama yönteminde de (APS ve HVOF) NiCrAlY bağ kaplamaları diğer NiCoCrAlY bağ kaplamalarına göre daha az erozyon direnci sergilemiştir. APS yöntemi ile üretilen NiCoCrAlY bağ kaplamalarında aynı yöntem ile üretilen NiCrAlY bağ kaplamalarına nazaran daha düşük bir sertlik değeri çıkmıştır. Bu durum daha fazla katı partikül erozyon aşınmasını gerektirdiği halde durum tam tersi olmuştur. Bunun nedeni NiCrAlY bağ kaplama yapılmış numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerinin fazla olması sebebiyle tekrarlanan partikül çarpmalarına karşı pürüzlülük tepe noktalarının daha fazla aşınmasıdır.

### 3.3 Yüksek Sıcaklığın Erozyon Oranına Etkisi

Deney numune gruplarının sıcaklık değişimine karşı katı partikül erozyon oranı değişiminin incelenmesi için 300 °C sıcaklıkta da oda sıcaklığında yapılan deneyler ile bütün koşullar aynı kalacak şekilde deneyler tekrarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en fazla aşınmanın meydana geldiği 30° çarpma açısında sıcaklık değişiminin etkisini görebilmek amacıyla oda sıcaklığında ve 300 °C’de oluşan kıyaslamalı çarpma açısı-erozyon oranı grafiği Şekil 5’te verilmiştir. Grafik incelendiğinde hemen

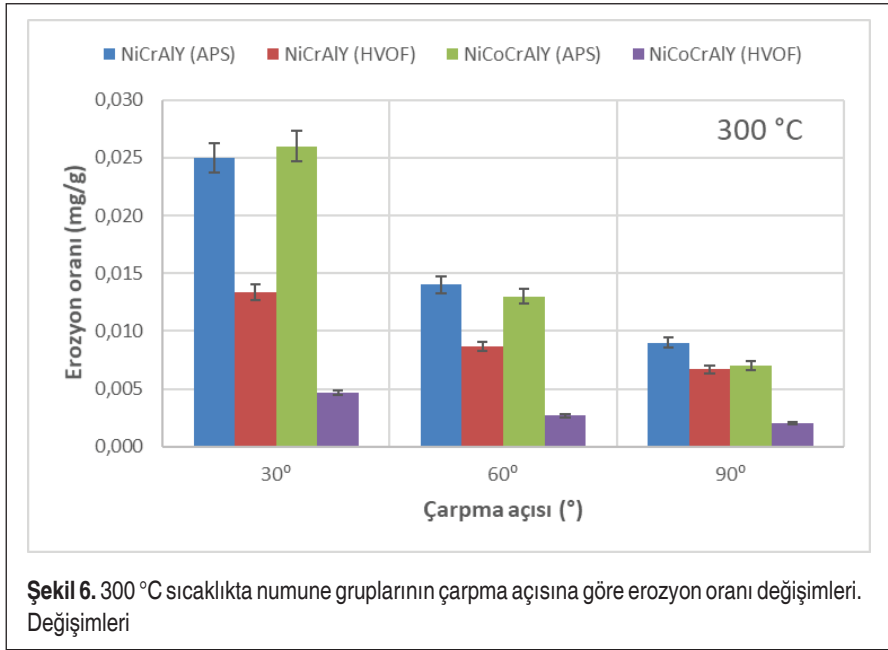


Şekil 5. 30° Çarpma Açısında Farklı Sıcaklıklardaki Erozyon Oranı Değişimi

hemen bütün numunelerin artan sıcaklık ile erozyon dirençlerinin arttığı görülmüştür. Sıcaklıktaki bu artışın yüzey üzerinde elastik bir form oluşturması sonucunda yüzeye çarpan eroziv partiküller gömülme etkisi yaparak sonraki çarpan partiküllere karşı muhafaza görevi yaptığı için erozyon direncini artırıcı etki yapmıştır. Ayrıca aşındırıcı partikül hızının fazla olmadığı ve artan sıcaklık ile metal malzeme yüzeyinde oksidasyon olduğu durumlarda yüzeyde oluşan oksidasyon tabakası malzeme yüzeyinde aşınmaya karşı dirençli bir yapının sağlanmasına sebep olmuştur [31].

Deney numuneleri arasında sıcaklık değişimine karşı erozyon oranına en az duyarlı numune grubu APS yöntemi ile üretilen kobalt katkılı bağ kaplamalar (NiCoCrAlY) olmuştur. Oda sıcaklığı ile 300 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneyler sonucunda APS yöntemi ile üretilen NiCoCrAlY bağ kaplamalarda sıcaklık değişiminin erozyon oranına etkisi %8 olurken, HVOF yöntemi ile üretilen bağ kaplamalarda bu oran %31 ile %46 arasında değişmiştir. Bu durum göstermiştir ki sıcaklık değişimine karşı HVOF yöntemi ile üretilen bağ kaplamalar erozyon aşınmasına daha fazla duyarlılık göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda çalışan bağ kaplamalarda sıcaklığın aşınmaya etkisini görmek açısından bu sonuçlar anlamlı bir veri olmuştur. Sıcaklığın artması ile bağ kaplama numunelerinin aşınma oranı sıralaması hemen hemen aynı kalmıştır. Fakat APS yöntemi ile kaplanan NiCoCrAlY bağ kaplamaları bu durumdan istisna olmuştur.

Yüksek sıcaklıkta (300 °C) ve bütün çarpma açılarında (30, 60 ve 90°) gerçekleştirilen deneyler sonucunda oluşan çarpma açısına bağlı erozyon oranı grafiği Şekil 6'da



verilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere APS yöntemi ile kaplanan NiCoCrAlY bağ kaplamaları 30° çarpma açısında en fazla erozyon oranı sergilemiştir. Diğer açılarda ise bu durum değişmiştir. Özellikle maksimum ve minimum erozyon oranının çıktığı 30 ve 90° çarpma açıları arasında bir oranlama yapıldığında %371 gibi en fazla oran APS yöntemi ile kaplanan NiCoCrAlY bağ kaplamalarda oluşmuştur. APS yöntemi ile üretilen diğer NiCrAlY bağ kaplamaları da HVOF yöntemi ile üretilen bağ kaplamalara kıyasla açısal değişimden daha fazla etkilenmişlerdir. Sonuç olarak APS yöntemi ile üretilen bağ kaplamaların erozyon oranını belirlemede açısal değişime daha fazla duyarlı oldukları tespit edilmiştir.

#### 4. SONUÇ

Gevrek malzemelerin erozyon oranında karşılaşılan 90° çarpma açısında en yüksek etkiyi oluşturma durumuna göre tam tersi bir sonuç ortaya çıkmış olup küçük açılarda (15-45°) erozyon direnci minimum seviyede gerçekleşmiştir.

APS yöntemi ile kaplanan bağ kaplamalar HVOF yöntemi ile kaplanan bağ kaplamalara kıyasla en az erozyon direnci göstermişlerdir.

HVOF yöntemi ile kaplanan bağ kaplamalar sıcaklık değişimine, APS yöntemi ile üretilen bağ kaplamalar ise açısal değişime karşı erozyon oranları daha fazla değişmiştir.



Kaplama malzemelerinde erozyon oranını belirlemede sadece sertlik değerinin belirleyici olmayacağı, gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğü gibi değerlerinde baskın olabileceği belirlenmiştir.

Sonuç olarak katı partikül erozyon aşınmasına malzeme özelliklerinin önemli oranda etki etmesi yanında kaplama yöntemi, aşındırıcı partikülün çarpma açısı ve ortam sıcaklık değişimleri de önemli belirleyici olmuştur. Bu durum kaplama malzemelerinin erozyon oranını tahmin etmenin daha karmaşık olduğunu göstermiştir.

## KAYNAKÇA

1. **Nicholls, J.R.**, et al., Smart overlay coatings — concept and practice. *Surface and Coatings Technology*, 2002. 149(2): p. 236-244.
2. **Pollock, T., D. Lipkin, and K. Hemker**, Multifunctional coating interlayers for thermal-barrier systems. *MRS bulletin*, 2012. 37(10): p. 923-931.
3. **Shen, M., et al.**, High vacuum arc ion plating NiCrAlY coatings: microstructure and oxidation behavior. *Corrosion Science*, 2015. 94: p. 294-304.
4. **Yang, L., et al.**, Microstructure and composition evolution of a single-crystal superalloy caused by elements interdiffusion with an overlay NiCrAlY coating on oxidation. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020. 45: p. 49-58.
5. **Zhang, J. and Y.-G. Jung**, Advanced ceramic and metallic coating and thin film materials for energy and environmental applications. 2018: Springer.
6. **Zhao, L., M. Parco, and E. Lugscheider**, Wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion strengthened MCrAlY coating. *Surface and Coatings Technology*, 2004. 184(2-3): p. 298-306.
7. **Rajendran, R.**, Gas turbine coatings—An overview. *Engineering Failure Analysis*, 2012. 26: p. 355-369.
8. **Sudhangshu, B.**, High temperature coatings. Publisher: Elsevier Science & Technology Books, 2007. 301: p. 301.
9. **Tabakoff, W.**, Investigation of coatings at high temperature for use in turbomachinery. *Surface and coatings technology*, 1989. 39: p. 97-115.
10. **Hamed, A.A., et al.**, Turbine blade surface deterioration by erosion. *Journal of turbomachinery*, 2005. 127(3): p. 445-452.
11. **Bolelli, G., et al.**, Performance of wear resistant MCrAlY coatings with oxide dispersion strengthening. *Wear*, 2020. 444: p. 203116.
12. **Jena, A. and M. Chaturvedi**, The role of alloying elements in the design of nickel-base superalloys. *Journal of Materials Science*, 1984. 19(10): p. 3121-3139.
13. **Metals, H.T.** Inconel 718 Technical Data. High Temp Metals 2019 [18.04.2019]; Available from: <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php>.
14. **Von Niessen, K. and M. Gindrat**, Plasma spray-PVD: a new thermal spray process to





- deposit out of the vapor phase. *Journal of thermal spray technology*, 2011. 20(4): p. 736-743.
15. **Kutz, M.**, *Handbook of environmental degradation of materials*. 2018: William Andrew.
  16. **Vuoristo, P.**, *Thermal spray coating processes*. 2014.
  17. ASTM G211-14, *Standard Test Method for Conducting Elevated Temperature Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*. 2014, PA West Conshohocken.
  18. **Wang, D., et al.**, Effects of laser remelting on microstructure and solid particle erosion characteristics of  $ZrO_2-7wt\% Y_2O_3$  thermal barrier coating prepared by plasma spraying. *Ceramics International*, 2014. 40(6): p. 8791-8799.
  19. **Schmitt, M.P., et al.**, Thermal conductivity and erosion durability of composite two-phase air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2015. 279: p. 44-52.
  20. **Hutchings, I. and P. Shipway**, *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2017: Butterworth-Heinemann.
  21. **Standard, A.**, E18-12: *Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
  22. **Foroozesh, J., et al.**, Computational fluid dynamics study of the impact of surface roughness on cyclone performance and erosion. *Powder Technology*, 2021. 389: p. 339-354.
  23. **Mikijelj, B. and J. Varela**, **Equivalence of surface areas determined by nitrogen adsorption and by mercury porosimetry**. *American Ceramic Society Bulletin*, 1991. 70(5): p. 829-831.
  24. **Diamond, S.**, Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement and concrete research*, 2000. 30(10): p. 1517-1525.
  25. **Bakan, E.**, *Yttria-Stabilized Zirconia/Gadolinium Zirconate Double-Layer Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coating Systems (TBCs)*. 2015: *Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren*.
  26. **Tilly, G.** A two stage mechanism of ductile erosion. *Wear*, 1973. 23(1): p. 87-96.
  27. **Bagci, M., et al.**, The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy nanocomposites. *Wear*, 2020. 444: p. 203159.
  28. **Nicholls, J.R., Y. Jaslier, and D. Rickerby**. Erosion and foreign object damage of thermal barrier coatings. in *Materials science forum*. 1997. Trans Tech Publ.
  29. **Mishra, S.B., S. Prakash, and K. Chandra**, Studies on erosion behaviour of plasma sprayed coatings on a Ni-based superalloy. *Wear*, 2006. 260(4): p. 422-432.
  30. **Shin, D. and A. Hamed**, Influence of micro-structure on erosion resistance of plasma sprayed 7YSZ thermal barrier coating under gas turbine operating conditions. *Wear*, 2018. 396: p. 34-47.
  31. **Birks, N., G.H. Meier, and F.S. Pettit**, *Introduction to the high temperature oxidation of metals*. 2006: Cambridge University Press.