

HAVACILIKTA KULLANILAN BAZI SÜPERALAŞIMLARIN YÜKSEK SICAKLIK GAZ OKSİTLENME DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Hacer Bahar BİLGİÇ ÖZEN¹, Uğur Gökşen HALICI², İlyas BAYRAK³, Neşe ÖZTÜRK KÖRPE⁴

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

ORCID No : <http://0000-0002-2795-1143>

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

ORCID No : <http://0000-0002-4320-3188>

³TUSAS Motor Sanayii A.S. (TEI), Eskişehir

ORCID No : <http://0000-0003-2451-2054>

⁴Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

ORCID No : <http://0000-0002-6868-8126>

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|--|
| Nikel Esaslı Süperalaşımalar Oksitlenme Kinetik | <i>Havacılıkta yüksek sıcaklık bölgelerinde kullanılan malzemeler, korozyona dirençli ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olmalıdırlar. Sektörden temin edilen ısıtma işlem görmüş Ni esaslı süperalaşımaları (Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738) öncelikle metalografik olarak hazırlandıktan sonra optik mikroskopta mikroyapıları görüntülenmiştir. Daha sonra oksitlenme deneyi için uygun boyuta getirilen numunelere 600 ve 900 °C sıcaklıklarında termogravimetrik analiz (TGA) cihazı ile 48 saat havada oksitlenme işlemi uygulanmıştır. Oksitlenen numunelerin yüzeylerinde oluşan oksit tabakaları tarayıcı elektron mikroskobu (SEM/EDS) ile görüntülenmiş ve elementel analizi gerçekleştirilmiştir. Arrhenius eşitliği kullanılarak difüzyon kat sayıları hesaplanmış ve oksijen difüzyon kinetiği belirlenmiştir. Bu çalışmanın önemi bazı süperalaşımaların oksitlenme kinetiklerinin ortaya çıkarılarak karşılaştırılması ve sektörün ihtiyacı olan kullanım açısından değerlendirme verilerine ulaşılmasını kolaylaştırmaktır.</i> |

COMPARISON OF HIGH-TEMPERATURE GAS OXIDIZATION BEHAVIORS OF SOME SUPERALLOYS USED IN AVIATION

| Keywords | Abstract |
|---|---|
| Nickel Based Superalloys Oxidation Kinetics | <i>Materials used in high temperature regions in aviation must be corrosion-resistant and have high strength values. Heat-treated Ni-based superalloys (Hastelloy X, Inconel 718 and Inconel 738) supplied by the industry were prepared metallographically, then their microstructures were visualized under an optical microscope. Then, the oxidation process in air was applied to the samples, which were brought to the appropriate size for the oxidation test, with a thermogravimetric analysis (TGA) device at 600 and 900 °C temperatures for 48 hours. The oxide layers formed on the surfaces of the oxidized samples were visualized with a scanning electron microscope (SEM/EDS) and elemental analysis was performed. Diffusion coefficients were calculated using the Arrhenius equation and oxygen diffusion kinetics were determined. The importance of this study is to reveal and compare the oxidation kinetics of some superalloys and to facilitate access to evaluation data in terms of usage that the industry needs.</i> |

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 06.02.2023

Submission Date : 06.02.2023

Kabul Tarihi : 10.07.2023

Accepted Date : 10.07.2023

*Corresponding author: neseoz@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1243242>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Havacılıkta kullanılacak 120.000'in üzerinde malzeme tanımlanmıştır. Bunları 65.000'in üzerinde metaller, 15.000'in üzerinde plastikler, 10.000'in üzerinde seramikler ve geri kalanını kompozitler ile ahşap gibi doğal malzemeler oluşturmaktadır. Fakat bu malzemelerin kullanılabilirliği, hafiflik, mukavemet, oksitlenme, sürtünme direnci ve kırılma tokluğu gibi özelliklerle sınırlandırıldığından bu oranın ancak % 0,05'i havacılık malzemesi olarak kullanımı mümkün kılacaktır. Havacılıkta kullanılan temel malzeme grubunu alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, çelikler ve kompozitler oluşturmaktadır. Bu malzemelere ilave olarak nikel esaslı alaşımlar jet motorları için önemli yapısal malzemeleri oluşturmaktadırlar. Gelişen teknoloji ile malzemelerin kullanım alanları da geliştirilmektedir (ASM International, 1991). Korozyon direnci malzemelerin tasarımında en önemli parametrelerdendir. Özellikle havacılık malzemelerinde yüksek maliyetli bakım onarım işlemlerinden dolayı korozyona dirençli malzemelerin üretilmesi önemlidir.

“Süperalaşımlar” terimi büyük ölçüde yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve genellikle VIII. Grup elementlerine dayalı bir grup alaşım tanımlamak için kullanılır (Kahraman, 2008). Süperalaşımların gelişim süreci 1930 yıllarında başlamıştır (uçak motorlarında turbo kompresörlerindeki malzemelerin ısıya karşı daha çok dayanıklılık ihtiyacı ile gelişim göstermiştir). Bundan sonraki adım 1940'lı yılların başlarında gelişmekte olan gaz türbin motorları teknolojileridir. Bu çalışmalar doğrultusunda süperalaşımlar: kobalt esaslı, nikel esaslı ve demir esaslı süper alaşımlar şeklinde 3 ana gruba ayrılırlar. Uçaklarda, gemilerde, endüstride ve taşıtlarda bulunan gaz türbinine ek olarak artık süperalaşımlar uzay araçlarında, roket motorlarında, deneysel uçaklarda, nükleer reaktörlerde, buharlı enerji tesislerinde, petrokimyasal teçhizatlar ve diğer yüksek sıcaklık barındıran uygulamalarda da kullanılmaktadır (Kahraman, 2008).

Süper alaşımların mukavemeti, alaşım elementleri, belirli bir sıcaklıkta mevcut olan kararlı fazlar, korozyona karşı dirençleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Patil ve Vagge, 2022).

Alaşım elementlerinin periyodik tablodaki konumu, süper alaşımda oluşan fazın kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Nikel, kobalt, demir, krom, molibden ve tungsten gibi elementler östenitik γ' fazına ayrılır ve bu da kararlılığı sağlar. Böylece alaşım elementlerinin çoğu geçiş metallerinin d bloğundan alınmaktadır. Bu elementlerin atomik yarıçapları neredeyse Nikel elementinin atomik yarıçapına eşittir. Alüminyum, titanyum, niyobyum ve tantal gibi başka bir grup element ise nikelde daha büyük atomik yarıçaplara sahiptir.

Bu elementler Östenit γ' fazı olarak bilinen $Ni_3(Al, Ta, Ti)$ bileşiği gibi düzenli fazların oluşumunu sağlamaktadır (Patil ve Vagge, 2022).

Inconel 718, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan ve çökeltme sertleşmesi ile mukavemetlendirilmiş demir-nikel esaslı süperalaşımların en yaygın kullanılan çeşididir (Sims, Stoloff ve Hagel, 1987).

Hastelloy X bir Ni-Cr-Fe-Mo alaşımıdır. İstisnai bir birleşime sahip yüksek sıcaklık dayanımı (Mo bakımından zengin karbürlerin varlığından dolayı (Pillai, Dryepondt ve Pint, 2019; Zhao, Larsen ve Ravikumar, 2000) mükemmel şekillendirme ve kaynak özellikleri ile oksitlenme ve stres-korozyon çatlaklarına karşı dirençli bir malzemedir. Hastelloy X alaşımı şu anda yanma bölgesi bileşenleri için gaz türbini motorlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, geçiş kanalları, yanma kutuları, püskürtme çubukları ve alev tutucular gibi brülörlerde, egzoz boruları ve kabin ısıtıcılarında da Hastelloy X kullanılır. Sulu kekler, katalizör destek ızgaraları, fırınlar için kimyasal işlem endüstrisinde perdelerde, piroliz işlemleri için kullanılan tüplerde ve flaş kurutma bileşenlerinde de yine bu malzeme tercih edilir (Tanner, 2009).

Inconel 738, mukavemetin yanı sıra iyi korozyon direnci gösteren nikel esaslı bir süperalaşımdır. Türbin, roket motorları ve denizcilik uygulamaları gibi alanlar, iyi bir mukavemete ve nispeten iyi bir korozyona ihtiyaç duymaktadır (Patil ve Vagge, 2022).

Bu çalışmada Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738 malzemelerinin yüksek sıcaklık oksitlenme davranışlarının belirlenmesi ve birbiriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738 alaşımları üzerinde oksitleme işlemleri 48 saate kadar olan sürede; 600 ve 900°C'de sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Elektron mikroskobu(SEM) ile oksitlenmiş yüzey görüntülenmiş, SEM/EDS ile elementel analizleri yapılmıştır. Termal gravimetrik analiz ile oksitlenme kinetikleri çıkarılmıştır. Alaşımlar kimyasal bileşimdeki ve mikroyapısal farklılıklarından dolayı farklı oksitlenme kinetiği göstermişlerdir. Ek olarak, difüzyon katsayıları ve oksijen difüzyonunun aktivasyon enerjisi iki alaşım için 600-900°C sıcaklık aralığında tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.1. Materyal

Çalışmalarda kullanılan Hastelloy X, Inconel 718, ve Inconel 738 numunelerinin kimyasal analizleri Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3 ile verilmiştir (Kahraman, 2008).

Tablo 1. Hastelloy X'in Kimyasal Bileşimi (ağ.%)

| Element | Ni | Cr | Fe | Mo | C | S | W | P | Co | Mn | Si |
|---------|----|----|----|-----|------|-------|-----|------|-----|-----|-----|
| Min(%) | 50 | 17 | 12 | 2,8 | - | - | 0,2 | - | 0,5 | - | - |
| Maks(%) | 55 | 21 | 24 | 3,3 | 0,08 | 0,015 | 1,0 | 0,04 | 2,5 | 1,0 | 1,0 |

Tablo 2. Inconel 718'in Kimyasal Bileşimi (ağ.%)

| Element | Ni | Cr | Fe | Mo | Nb+Ta | C | Mn | Si | B | P | S | Al | Co | Ti |
|---------|----|----|----|-----|-------|------|------|------|------|-------|-------|-----|-----|------|
| Min(%) | 50 | 17 | 12 | 2,8 | 4,75 | - | - | - | - | - | - | 0,2 | - | 0,65 |
| Maks(%) | 55 | 21 | 24 | 3,3 | 5,50 | 0,08 | 0,35 | 0,35 | 0,06 | 0,015 | 0,015 | 0,8 | 0,3 | 1,15 |

Tablo 3. Inconel 738'in Kimyasal Bileşimi (ağ.%)

| Element | C | Mn | Si | Cr | Ti | Al | Fe | B | Zr | Nb | Ta | Mo | W | Co | Cu | P | S | Ni |
|---------|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|
| Min(%) | 0,09 | - | - | 15,7 | 3,2 | 3,2 | - | 0,007 | 0,03 | 0,6 | 1,5 | 1,5 | 2,4 | 8,0 | - | - | - | - |
| Maks(%) | 0,13 | 0,2 | 0,3 | 16,3 | 3,7 | 3,7 | 0,35 | 0,012 | 0,08 | 1,1 | 2,0 | 2,0 | 2,8 | 9,0 | 0,1 | 0,01 | 0,015 | kalan |

2.2. Metot

Numunelerden bir kısım kesilerek mikro yapılarını incelemek üzere bakalit ile kalıplanmıştır. Kalıplanan numuneler, 180-320-600-1200 mesh ölçülü zımpara kâğıtları ile zımparalanarak, elmas pasta ile 15-20 dakika parlatılmıştır. Daha sonra numuneler nikel süperalaşmaları için hazırlanmış olan solüsyon (10 ml Hidroklorik asit (HCl) - 10 ml Methanol - 2 ml Hidrojen peroksit (H₂O₂) ile dağlanarak optik mikroskopta görüntüleri elde edilmiştir. Mikro-yapı görüntüleme çalışmaları ESOĞÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan optik mikroskop ve buna bağlı görüntü analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

TGA testi ile oksitleme deneyleri için kullanılmak üzere hazırlanan numuneler yaklaşık 3 cm² alanına sahip boyutlarda kesilerek ultrasonik olarak asetonla temizlenmiştir. Termogravimetrik analizler farklı sıcaklıklarda izotermal olarak bölüm bünyesindeki Perkin Elmer Diamond marka termogravimetrik/diferansiyel termal analizör cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Oksitleme işlemi için numuneler, 48 saat boyunca, 20 °C/dk hız ile çıkılan 600-900 °C sıcaklıklarında havada oksitlenmişlerdir. Termogravimetrik analiz sonuçlarından, ağırlık değişimi (Δm), elde edilen ağırlık değerlerinden başlangıçtaki ağırlık değeri çıkarılarak elde edilmiştir.

Oksitleme deneylerinden elde edilen termogravimetrik verilerden şekilde gösterildiği gibi parabolik hız sabitleri hesaplandı. Parabolik korozyon hız sabitlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır (Kutz, 2018):

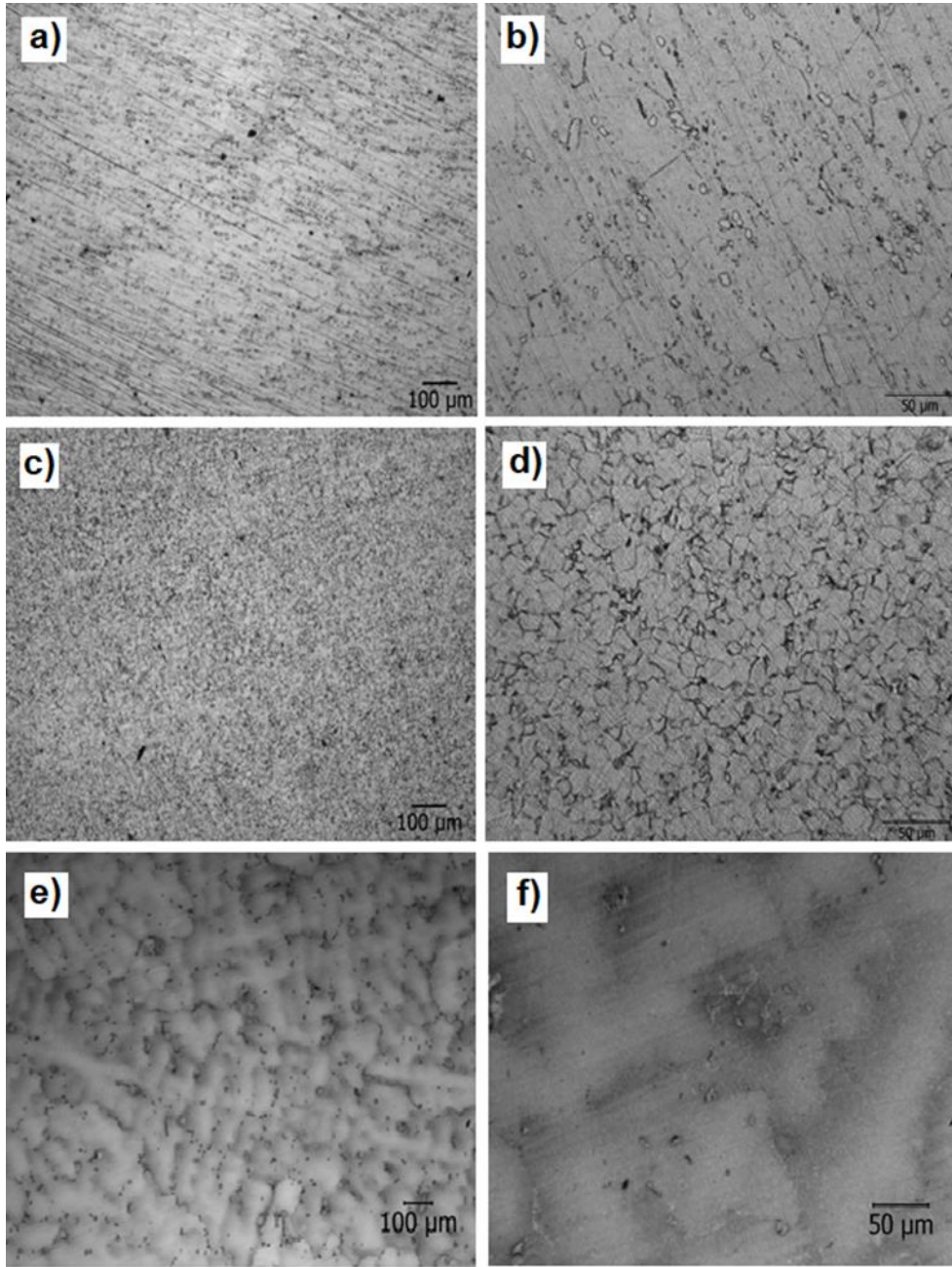
$$\left(\frac{\Delta m}{A}\right)^2 = k_p t. \quad (1)$$

Burada Δm numunenin ağırlık değişimi, A yüzey alanı, k_p parabolik hız sabiti ve t işlem süresidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Literatürde Hastelloy X alaşımı için γ matris içerisinde krom ve molibden zengin karbür fazlarının varlığı tanımlanmıştır (Erdoğan, Çakmakaya ve Erol, 2005). Mikroyapıda görülen küreciklerin bu fazlar olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 1a-b). Inconel 718 alaşımında NbC fazı baskındır ve α -Cr metallerarası bileşiği nikelin az olduğu bölgelerde kürecik halinde oluşur (Şekil 1c-d) (Davis, 1997).

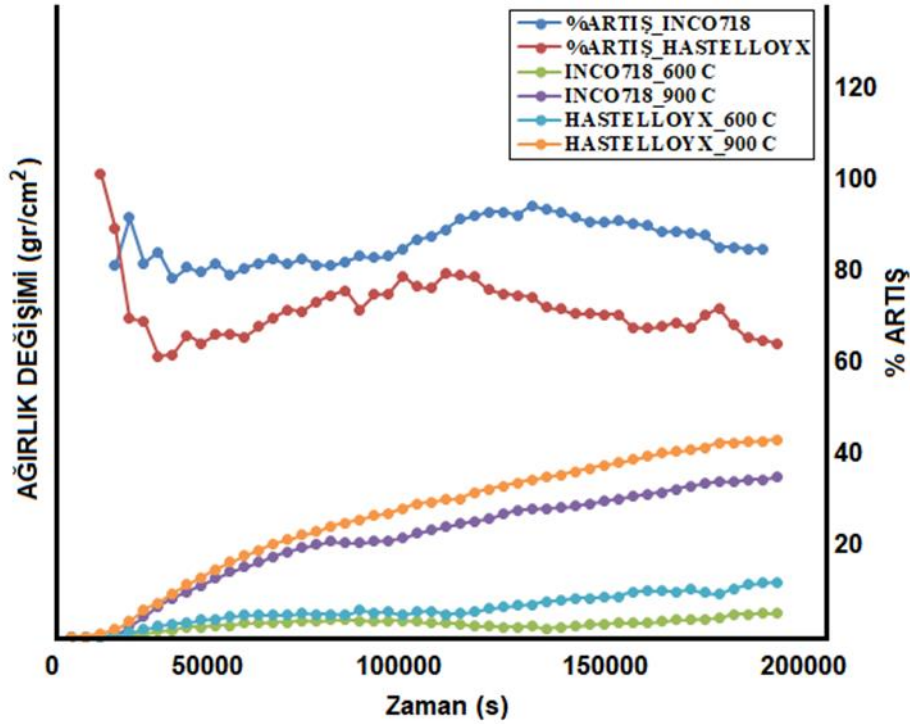
Önemli oranda Al ve Ti içeren Ni esaslı alaşımlarda Ni₃(Al,Ti) çökeltilerinin (γ') çözünmesi ısıl işlem şartlarına bağlıdır. Bir miktar çözünmemiş çökeltiler (Çelik, 2006), Inconel 738 alaşımının mikroyapısında görüntülenmiştir (Şekil 1e-f).



Şekil 1. Hastelloy X Numunesinin Optik Mikroskop Fotoğrafi a) 50X, b) 200X; Inconel 718 Numunesinin Optik Mikroskop Fotoğrafi c) 50X, d) 200X; Inconel 738 Numunesinin Optik Mikroskop Fotoğrafi e) 50X, f) 200X

Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738'in oksitlenme davranışının belirlenmesi için 600°C ve 900°C' de havada oksitlenme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

48 saat boyunca elde edilen ağırlık değişimleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Hastelloy X ve Inconel 718 600°C ve 900°C'de Ağırlık Değişimi-Süre Grafikleri

600°C ve 900°C sıcaklıklarında oksitlenen alaşımlar için hesaplanan k_p , parabolik hız sabitleri Tablo 4' te gösterilmiştir. Inconel 738 alaşımı için başlangıçta ve işlem sırasında yüksek Ti içeriğine bağlı olarak koruyucu olmayan oksit tabakasına bağlı olarak ağırlık azalması tespit edildiğinden değerlendirmeye alınmamıştır (Şekil 2). Yüksek Mn ve Si içerikli alaşımlarda daha hızlı oksitlenme kinetikleri gözlenmiştir (Tablo 4).

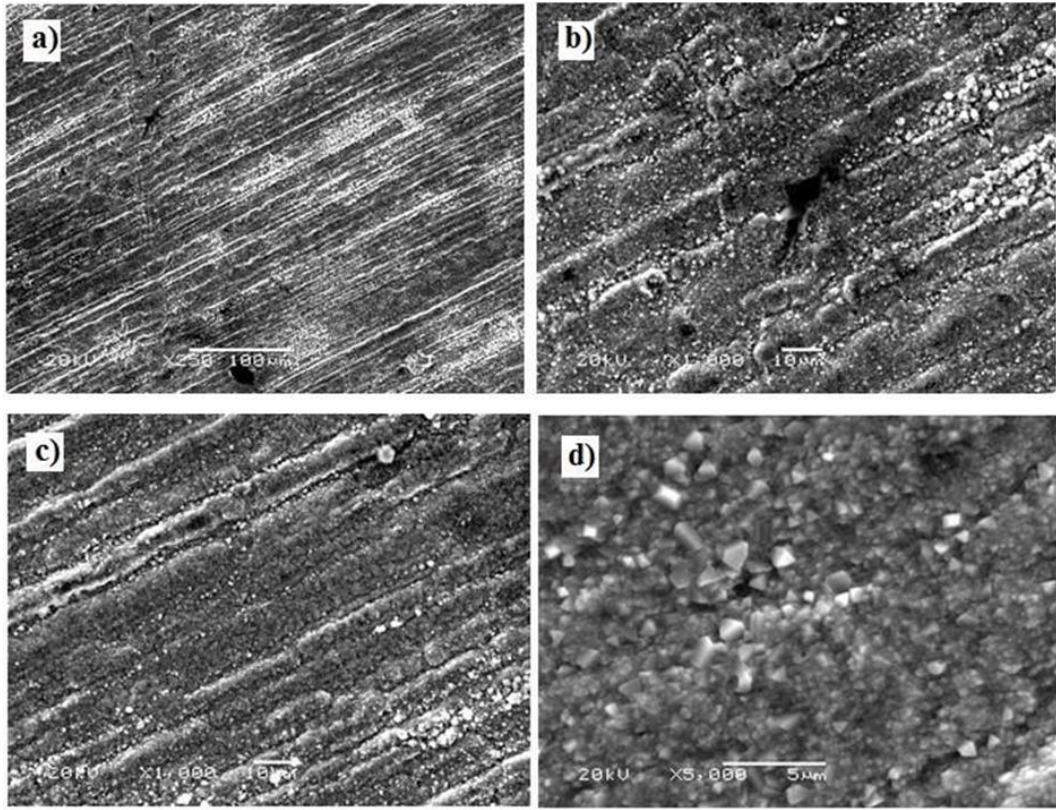
Tablo 4. Inconel 718 ve Hastelloy X Süperalaşımlarının Hesaplanan k_p Parabolik Oksitlenme Hız Sabiti ($\text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$) Değerleri

| Malzeme | 600°C | 900°C |
|-------------|---|---|
| | $k_p (\text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1})$ | $k_p (\text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1})$ |
| Inconel 718 | 2,00E-08 | 7,00E-07 |
| Hastelloy X | 1,00E-07 | 6,00E-06 |

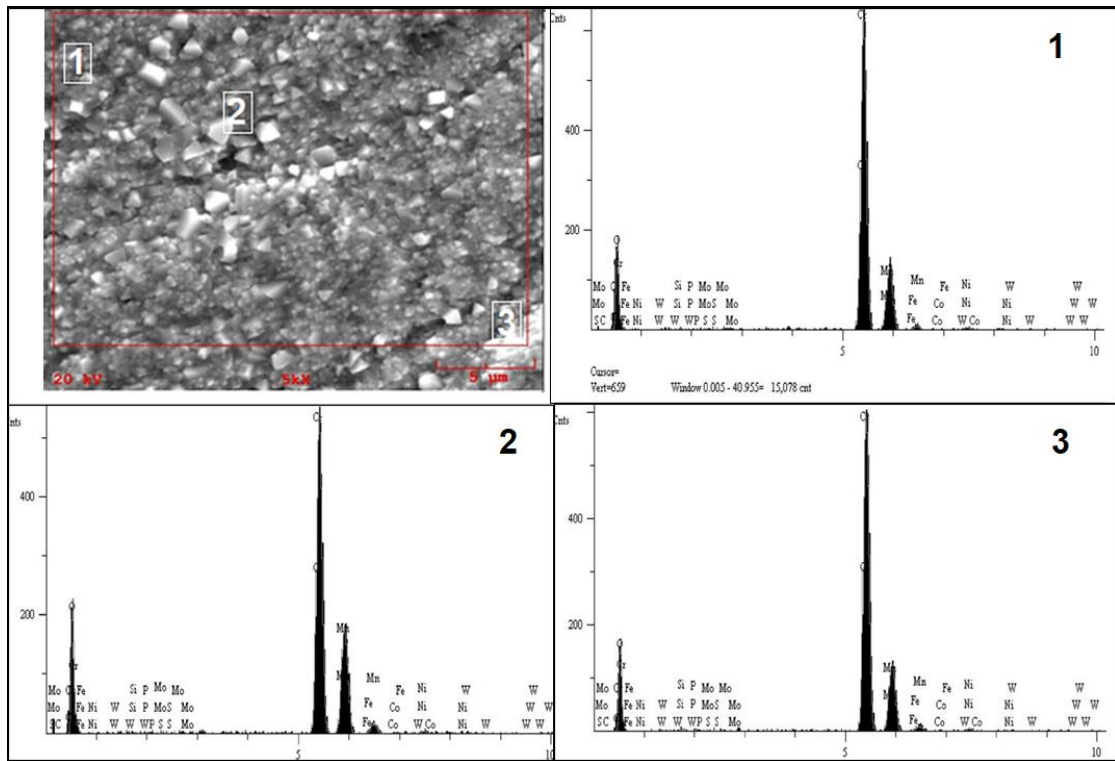
900°C' de gerçekleşen oksitlenme işlemlerinden sonra numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve elementel analizleri yapılmıştır.

Literatürde genel olarak, yüksek sıcaklıklarda Hastelloy X alaşımları yeterli Mn içeriyorsa, bir iç koruyucu Cr_2O_3 tabakası ve kısmi SiO_2 alt tabakası ile birlikte bir dış $(\text{Ni,Fe,Cr})_2\text{O}_4$ veya MnCr_2O_4 spinel oluşturduğu gözlemlenmiştir (Schütze, 1995). Mevcut çalışmada da SEM/EDS elementel analizine göre Hastelloy X için çoklu tabaka ($\text{SiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{MnCr}_2\text{O}_4$) olduğu söylenebilir (Şekil 3, Şekil 4).

Literatürde (Mn, Si) içeren süperalaşımlar için daha yüksek oksitlenme ve bozulma oranları bulunmuş ve bu da tane sınırlarında Mo, Si bakımından zengin karbürlerin varlığı ile ilişkilendirilmiştir (Dryepondt, Kirka ve List, 2019).



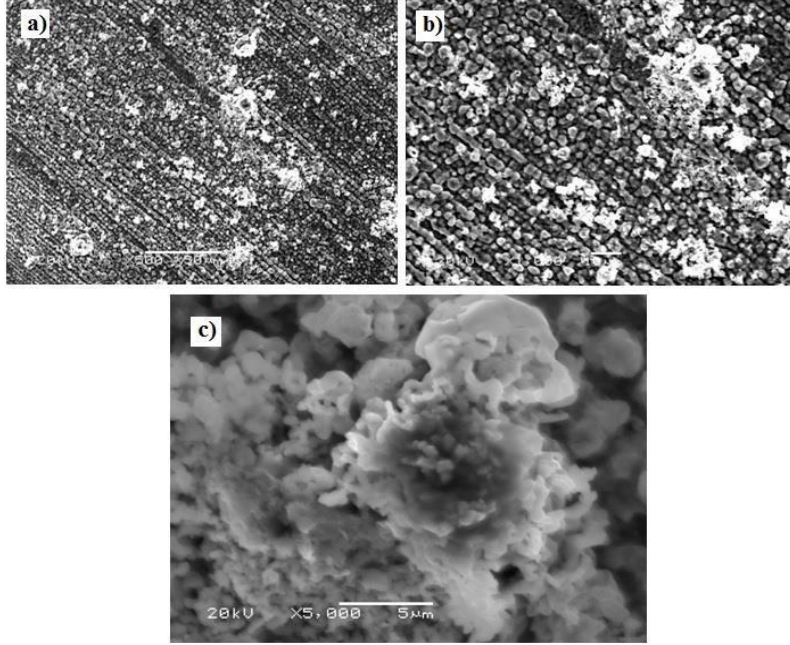
Şekil 3. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Hastelloy X Alaşımı SEM Görüntüleri a) 250X, b) 1000X, c) 1000X, d)5000X



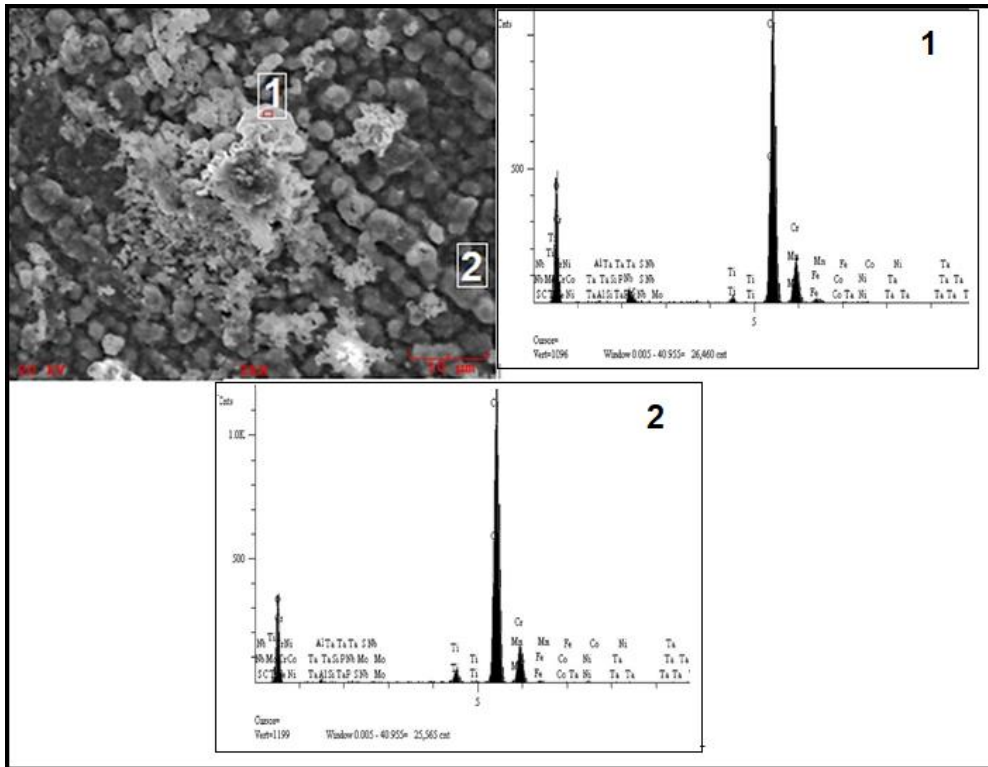
Şekil 4. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Hastelloy X Alaşımı EDS Analizleri

Hastelloy X alaşımlarına benzer olarak yüksek Mn ve Si içerikli alaşımlar, altta SiO_2 çökeltileri bulunan bir Cr_2O_3 tabakasının üzerinde MnCr_2O_4 'ten oluşan bir dış oksit tabakası oluşturmuştur.

Bir MnCr_2O_4 tabakasının varlığında, alttaki alaşımda daha ince bir Cr_2O_3 tane mikroyapısı ve daha büyük Mn tüketimleri gözlenmiştir (Şekil 5, Şekil 6).



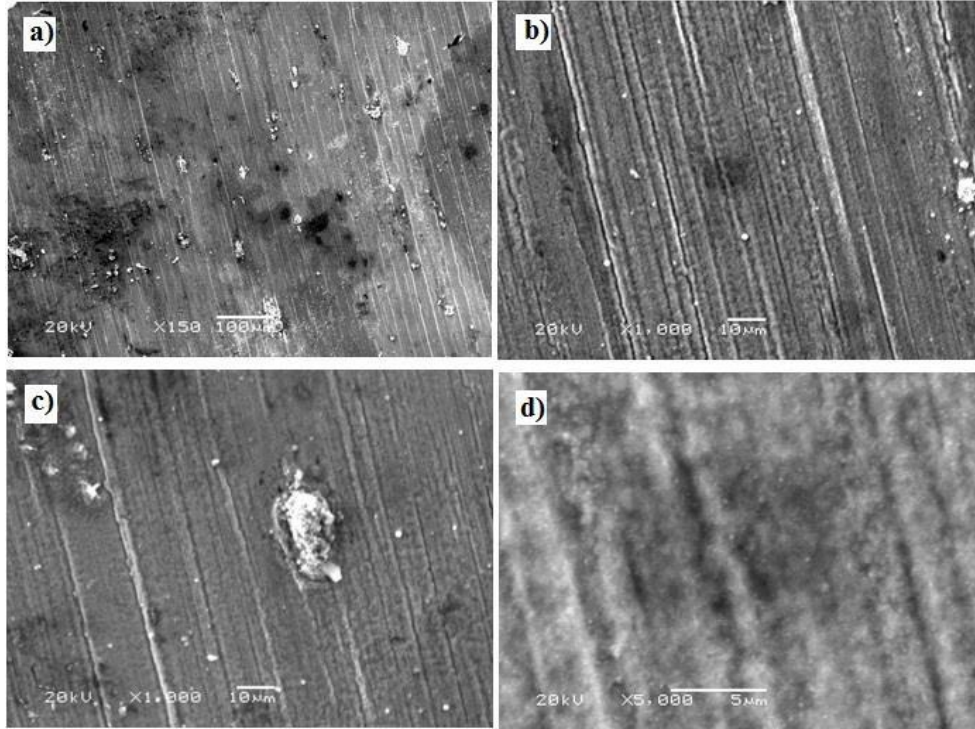
Şekil 5. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 718 Alaşımı SEM Görüntüleri a)600X, b) 1000X, c) 5000X



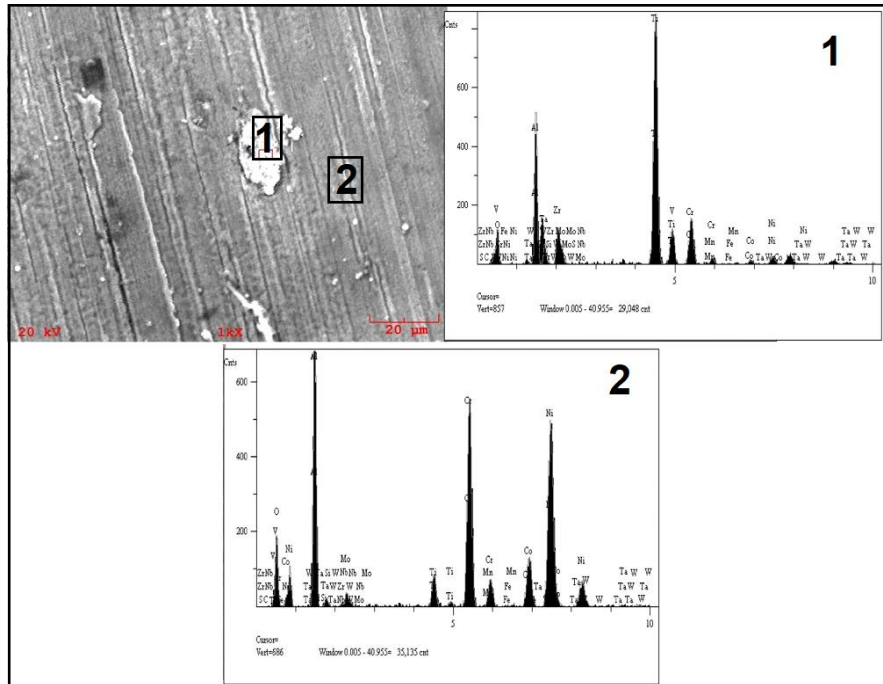
Şekil 6. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 718 Alaşımı EDS Analizleri

Yüksek Ti içeren Inconel 738 alaşımında daha yüksek oksitlenme oranlarının Ti elementinin uygulama sıcaklığında koruyucu olmayan oksit oluşturmasının

yanı sıra daha ince Cr_2O_3 tane mikro yapısı ile ilişkilendirilmiş ve geniş tabakada dökülme gözlemlenmiştir. Cr tükenmesi ile oksit tabakası direncinin azaldığı düşünülmektedir (Şekil 7, Şekil 8).



Şekil 7. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 738 Alaşımı SEM Görüntüleri a) 150X, b) 1000X, c) 1000X, d) 5000X



Şekil 8. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 738 Alaşımı EDS Analizleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bazı Nikel esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklık oksitlenme davranışının belirlendiği mevcut çalışmada 600°C' de çok az ağırlık değişimi tespit edilmiştir. Hastelloy X ve Inconel 718 alaşımlarında 900°C' de yapılan oksitlenme işlemlerinde iyi oksitlenme direncine sahip oldukları gözlenmiştir. Hastelloy X ve Inconel 718 alaşımlarında Cr₂O₃ koruyucu oksit tabakasının yanı sıra Cr-Mn spineli oluşumu saptanmıştır. Bu spinel fazın yüksek sıcaklıklarda uçucu kromoksit oluşumunu engellediği bilinmektedir (Bradley, 1988; Tillack, 2007). Inconel 738 alaşımının yüksek sıcaklık oksitlenmesinde oksit tabakasının çok ince oluşumu ve yüksek Ti içeriğine bağlı olarak koruyucu olmadığı saptanmıştır. Çalışma kapsamında mevcut malzemelerin yüksek sıcaklık gaz oksitlenme davranışlarının ortaya çıkarılmasıyla mevcut malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kullanımında ortaya çıkabilecek hasarın değerlendirilmesinde kullanılacak somut verilere ulaşılmıştır. Ancak özellikle ince tabaka oluşumu nedeniyle tabakanın görüntülenmesi için EPMA analizi ve ince film XRD analizi gibi ileri tetkiklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Teşekkür

Bu makale Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), TUSAŞ Motor Sanayi (TEI) ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi arasında 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında 1139B411701481 numaralı yürütülen projenin bir çıktısıdır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada verilerin elde edildiği projede, Yazar 1 yürütücü, Yazar 2 sanayii danışmanı, Yazar 3 araştırmacı, Yazar 4 danışman olarak görev almışlardır. Tüm yazarlar makalenin yazımında katkı sağlamışlardır. Dört yazar da makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Bradley, E. F. (1988). Superalloys-A technical guide ASM International. Metals Park, OH.

Çelik A. (2006). Nikel esaslı süperalaşımların talaşlı işlenmesi için SiALON esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi (Yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Davis, J.R., (1997). Heat Resistant Materials. ASM Specialty Handbook, ASM International, 221-254..
- Dryepontd, S., Kirka, M. M., & List, F. A. (2019, March). Oxidation behaviour of Ni-based alloys fabricated by additive manufacturing. Paper presented in CORROSION 2019, Nashville, Tennessee, USA.
- Erdoğan, M., Çakmakkaya, M. ve Erol A. (2005). Katkı elementlerinin süperalaşımlara kazandırdığı genel özellikler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Bölümü Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, www.teknolojekarastirmalar.com, Erişim Tarihi: 19.12.2017.
- Kahraman, F. (2008). Süperalaşımların nitrürlenerek yüzey özelliklerinin incelenmesi (Doktora tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kutz, M. (2018). Handbook of environmental degradation of materials. William Andrew Applied Science Publishers, Elsevier.
- Patil, A. R., & Vagge, S. T. (2022). Hot corrosion behaviour of Inconel 738 superalloy in presence of NaCl, Na₂SO₄, V₂O₅. Materials Today: Proceedings, 65, 74-80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.068>.
- Pillai, R., Dryepontd, S., & Pint, B. A. (2019). High temperature oxidation lifetime modelling of thin-walled components. In Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, American Society of Mechanical Engineering, 58677, V006T24A008. doi: <https://doi.org/10.1115/GT2019-90505>.
- Schütze, M. (1995). Mechanical properties of oxide scales. Oxidation of Metals, 44(1), 29-61. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01046722>.
- Sims, C. T., Stoloff, N. S., & Hagel, W. C. (1987). Superalloys II (Vol 8). New York: Wiley.
- Tanner, D. W. J. (2009). Life assessment of welded INCONEL 718 at high temperature (PhD Thesis). University of Nottingham.
- Tillack, D. J. (2007). Welding superalloys for aerospace applications. Welding Journal, 86(1), 28-32. Redrieved from <http://pascalfrancis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=18441725>.
- Zhao, J. C., Larsen, M., & Ravikumar, V. (2000). Phase precipitation and time-temperature-transformation diagram of Hastelloy X. Materials Science and Engineering: A, 293(1-2), 112-119. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01049-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01049-2).