



Borlama İşlemi Uygulanmış Inconel 718 Süperalaşımın Mikroyapı, Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Microstructure, Wear and Mechanical Properties of Boronized Inconel 718 Superalloy

Hüseyin Duran¹, Derviş Özkan^{1*}, Abdullah Cahit Karaoğlanlı²

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

²Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, yüksek korozyon ve yüksek sürünme dayanımına sahip olan Inconel 718 Ni-esaslı süperalaşım malzemenin borlama işlemi uygulandıktan sonraki aşınma davranışı incelenmiştir. Inconel 718 altlık malzemesine 950°C'de Ekabor-II tozu ortamında 4, 8 ve 16 saatlik süreli periyotlarda kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama prosesi sonucunda yapıda oluşan fazlar, oluşan kaplama tabakasının özellikleri ve aşınma özelliklerinin incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskop analizi, X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi, sertlik ölçümleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri işlem görmemiş Inconel 718 ve farklı sürelerde borlanmış numunelere farklı yükler (3N, 5N, 10N ve 15N) altında, ileri-geri (reciprocating) aşınma testi uygulanarak aşınma yüzey profilleri elde edilmiş ve aşınma performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Numunelerin ayrıca sıralı sertlik değerleri belirlenmiştir. Karakterizasyon incelemeleri sonucunda Ni₂Si, Ni₄B₃ ve FeB fazından oluşmuş kaplama tabakaları elde edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda aşınma dayanımı en iyi olan numunenin 950 °C'de 4 saatlik borlama süresine tabi tutulan numune olduğu ve oluşan aşınma mekanizmasının abrasif aşınma şeklinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Borlama, Inconel 718, Mikroyapısal özellikler, Süperalaşım

Abstract

In this study, the wear resistance of Inconel 718 Ni-based superalloy, which has high corrosion and creep resistance but has limited use in tribological applications due to its low surface roughness was improved via boriding method. Pack-boriding process was applied on Inconel 718 substrate material at 950°C using Ekabor-II powder for 4, 8 and 16 hours boriding periods. Scanning electron microscopy (SEM), optical microscopy analysis, X-ray diffraction (XRD) analysis, microhardness measurements and tribological tests were performed to assess the effect of resulting phases and coating layer on the metallographic and mechanical properties of the borided specimens. In this study, Inconel 718 superalloy substrate was pack borided with boron and coal dust at 950°C for 4, 8 and 16 h. The phases formed in the samples as a result of the boronizing process and the effects of boron layer on the mechanical properties of the material were investigated. Reciprocating wear tests were applied under varying loads (3N, 5N, 10N and 15N) on the non-borided and borided samples and their wear performances were comparatively evaluated. The specimens' hardness ranking was determined. As a result of the characterization studies, layers consisting of Ni₂Si, Ni₄B₃ and FeB were detected. The sample with the best wear resistance was the one subjected to a boronizing time of 4 h at 950 °C. This result was further supported by the finding that, the hardest layer exhibiting the best diffusion behavior belonged to this sample. This was attributed to the formation of a uniform boride layer in the vertical direction from the surface and the high hardness of this layer.

Keywords: Wear, Boronizing, Inconel 718, Microstructural properties, Superalloy,

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: dervisozkan@bartin.edu.tr

Hüseyin Duran orcid.org/0000-0002-9042-3554

Derviş Özkan orcid.org/0000-0002-4978-290X

Abdullah Cahit Karaoğlanlı orcid.org/0000-0002-1750-7989

1. Giriş

Yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş, yüksek alaşım malzeme grubu olan süperalaşım, 1900'lü yılların başlarında gaz türbinlerin kullanımında, 1950-70 yılları arasında ise gelişimleri hız kazanarak ve östenitik paslanmaz çeliklerin bir türevi olarak ön plana çıkmaktadır. 1980'li yıllarda ise bazı elementlerin süperalaşım malzemelerine eklenmesiyle yoğun ilgi artmış ve bu malzemelere spesifik mekanik özellikler kazandırılmıştır (Yu vd. 2018, Sklenička vd. 2018). Darbe ve dayanıklılık kaybı olmadan 540 °C ile 1000 °C arasında yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışabilmektedir. Bu kapasiteleri sayesinde uçak motoru üretiminde kullanılmak üzere en çok tercih edilen malzeme sınıfındadır. Bu ve benzeri alanlarda mukavemetlerini korumak ve yüksek sıcaklık koşullarında mikro yapılarını dengeli tutmaktadırlar. Son on yılda ise, ergitme teknolojisindeki gelişmeleri, alaşımlamanın etkileri, termo-mekanik çalışmalar sayesinde yeni alaşımların ortaya çıkmasına olanak sağlamışlardır. Yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımı gibi performansları artırılmasıyla günümüzde Ni ve/veya Ti esaslı süperalaşım geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Bose 2007, Saman 2011). Mekanik ve korozyon direncini artırmak için Al, Ti, Nb, Co, Cu ve W elementlerle ilave alaşımlandırılırlar. Demir (Fe) ise, 1–20% aralığında Inconel alaşımları içerisinde yer almaktadır (Subaşı vd. 2016). Süperalaşım, genellikle gaz türbinlerinde olduğu gibi çalışma sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda ısıl dayanımı yüksek olan Nikel esaslı süperalaşım kullanılmaktadır. Nikel esaslı süperalaşımın 1100 °C gibi yüksek sıcaklıklarda mukavemetinin yüksek olması bu malzeme grubunu bu ortamlarda tercih edilir kılmıştır (Donachie ve Donachie 2002, Bose 2007). Bu alaşımlar son derece iyi oksidasyon ve korozyon direnciyle, yüksek sıcaklık şartlarında sürünme ve kırılma direnci sağladığından uçak motoru parçalarında sıklıkla tercih edilir (Bochenek ve Basista 2015). Nikel esaslı süperalaşım, süperalaşım içinde en kompleksi, en çok kullanılan ve birçok metalürji uzmanına göre en ilgi çekici olanıdır. Jet motorlarının ağırlığının yarısını bu alaşım grubundandır (Kaplanski vd. 2020, Yang vd. 2015). Süperalaşım bir malzeme yaklaşık ergime sıcaklığının %70'ine kadar çıkılan sıcaklıklarda kullanılabilir. Süperalaşım çok kristalli, yönlendirerek katılaştırılmış veya tek kristal olarak üretilmektedir (Schulz vd. 2001). Günümüz endüstrisinde özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan ve süperalaşımlardan imal edilmiş türbin bıçakları ve kanatçıklarının performanslarını ve servis ömürlerini

daha da artırmak amacıyla aynı zamanda kaplamalar da uygulanmaktadır. Bunun yanında aynı amaç doğrultusunda katmanlı kaplamalar da günümüzde popülerliğini sürdürebilmektedir (Monceau vd. 2010, Dwivedi vd. 2013). Inconel 718 süperalaşım malzemesi, özellikle havacılık ve uzay endüstrisindeki özel uygulamalarda üstün özellikleri sebebiyle kullanılır. Kimyasal malzemeler ile temas halinde olan parçalarda, denizcilik araçlarında ve parçalarında, roket motor parçalarında, çok özel amaçlar için üretilen depo tanklarında, nükleer reaktör parçalarında, bağlantı elemanlarında, vanalarda ve türbin pervane bıçakları gibi kullanımları yaygındır (Kuo vd. 2009, Akca ve Gürsel 2015). En önemli yüzey sertleştirme uygulamalarından olan termo-kimyasal borlama işlemi; metallerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için uygulanan difüzyon esaslı bir yüzey sertleştirme işlemi ile oluşan bor tabakasının sert, sürtünme katsayısının ise düşük olması, asit ve bazlardan kaynaklı korozyon ortamlara ve yüksek sıcaklıklardaki korozyona iyi direnç göstermesi sayesinde diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre daha üstündür. Bu proses sayesinde malzeme yüzeyinde oluşturulan borür tabakaları ile yüzey sertliği önemli derecede artırabilirken tribolojik özellikler ve korozyon direnci de iyileştirmektedir. Termo-kimyasal ve elektro-kimyasal olarak uygulanabilen difüzyon esaslı bir proses olan borlama diğer proseslere göre daha iyi sertlik ve aşınma sağlamaktadır (Makuch ve Kulka 2016, Makuch 2020). Farklı borlama işlemleri uygulansa da genelde kutu, sıvı ve gaz ortamı şekillerinde uygulanabilir. Bu işlemler arasında kutu borlama tekniği en kullanışlı olup kutu sementasyona benzemektedir (Günen ve Kanca 2017). Borlama işlemi, malzeme yüzeyine nikel borürlerin oluşmasına bağlı olarak mekanik ve kimyasal özellikleri (yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi) geliştirmek için nikel bazlı süperalaşım üzerinde gerçekleştirilen bir uygulamadır (Günen 2020, Deng vd. 2015, Cataldo vd. 2000). Bu işlem sayesinde tribolojik dayanımı bakımından başka termo-kimyasal işlemlere göre çok daha iyi aşınma dayanımı sağlamaktadır (Campos-Silva vd. 2018). Borlanmış Ni bazlı süperalaşım, gaz türbini motorunun itme vektörü nozul taşıyan bileşenleri gibi uygulamalarda, aşınmalarını, safralarını ve korozyonlarını azaltmasıyla fayda sağlamaktadır (Joshi vd. 2017).

Inconel 718 süperalaşımı, içerisinde önemli miktarda Ni, Fe ve Nb içeren demir nikel bazlı ve içerdiği yüksek niyobyum sayesinde çökelti sertleşmesi ile yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğundan dayanımını 650 °C'ye kadar korumaktadır. Uçak motorları, nükleer tesisler gibi yüksek

sıcaklık dayanımı ve mukavemeti istenen uygulamalarda aranan malzemedir. Yüzey kaplama işlemleri, malzemeyi hem görünüş hem de fiziksel ve kimyasal bakımdan daha dayanıklı hale getirmek için bir metalin yüzeyini metal, ametal veya organik madde ile kaplama işlemleridir. Borlama ısı işlemi ise, bor atomlarının metal yüzeyine difüzyonu ile malzeme yüzeyini güçlendiren bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme uygulamasıdır. Borlama, termo-kimyasal bir yüzey prosesi olarak malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kapsamda ilgili alanda yürütülen ar-ge çalışmaları bilimsel ve endüstriyel kurum/kuruluşlar tarafından güncelliğini korumaktadır. Teknolojik araştırmaların büyük bir kısmı endüstriyel uygulama alanlarında kullanım alanı bulan malzeme ve yüzey kaplama teknolojilerinin kalitesini yükseltmeye, daha ekonomik çözümler getirmeye yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık koşulları altında havacılık endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahip Inconel 718 nikel bazlı süperalaşım altlık malzeme üzerine borlama prosesi uygulanmış ve mikroyapısal, mekaniksel ve tribolojik davranışlar farklı proses koşulları altında incelenerek, ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, 25.4 mm çapındaki, 5 mm kalınlığında disk şeklinde Ni esaslı bir süperalaşım olan Inconel 718 altlık numuneler kullanılmıştır. Kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilen (Makuch ve Kulka 2014), ısı işlemine maruz kalmış Inconel 718 süperalaşımı, kutu borlama yöntemi ile

borlanmış, ticari Ekabor-II tozu kullanılarak karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

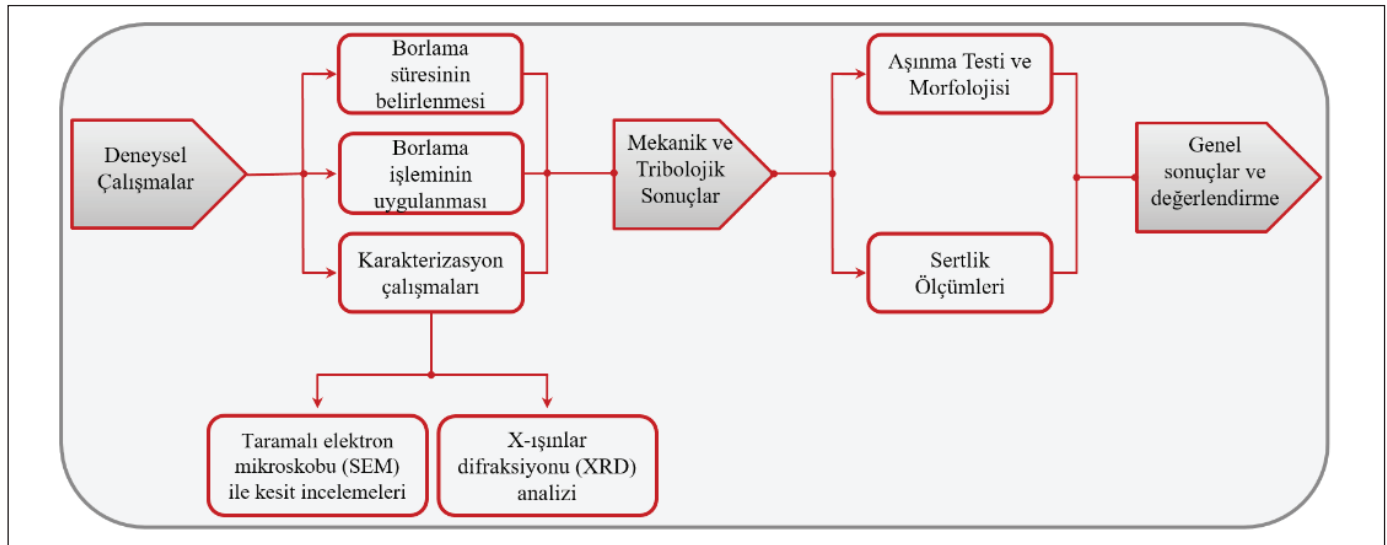
Çizelge 1. Inconel 718 süperalaşıma ait kimyasal bileşim, % ağırlık.

Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	C
52.5	18.5	19.0	5.1	3.0	0.9	0.5	0.08

Numuneler Discotom 100 kesme cihazında daha küçük parçalar haline getirilmiştir. Kesme cihazından çıkan parçalara otomatik zımparalama işlemine tabi tutabilmek için CitoPress 10 cihazı yardımıyla bakalite alma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan numunelerin Tegramin 30 zımparalama/parlatma cihazı ile sırasıyla 240-400-600-800-1000-1200-2000-3000 kaba/ince zımpara aşamalarından geçirilerek parlatma için yüzeyleri temizlenmiştir. Deneysel için kullanılan numunelerin önce 6 µm sonrasında 3 µm elmas süspansiyon kullanılarak yüzey parlatma işlemi sonlandırılmıştır. Borlanacak parçalar, ısıya dayanıklı kutu içine borlama tozuyla (ticari Ekabor-II) kaplanmak üzere 10-20 mm kadar gömülmüştür. Bu işlemten sonra üst kısmına dolgu malzemesi (SiC, ekrit, alüminyum tozu vs.) doldurularak hava geçişi engellenecek şekilde kapak kapatılmıştır.

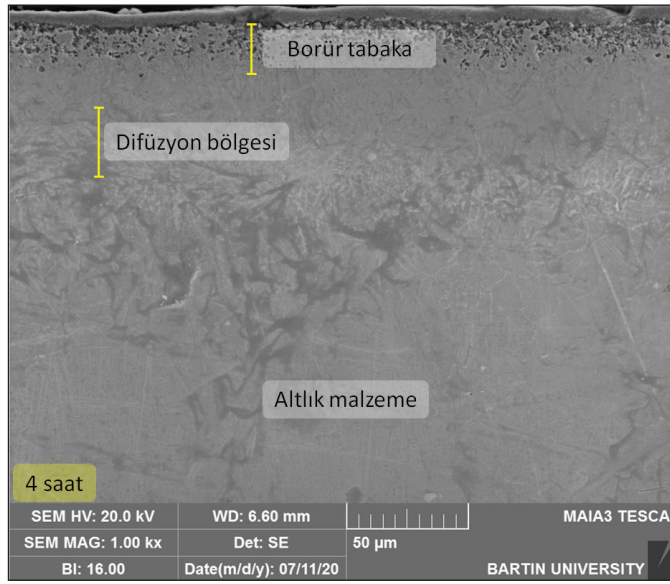
2.2. Malzemelerin Karakterizasyon Analizleri

Çalışmada izlenen yöntemin akış şeması Şekil 1'de verilmiştir. Kaplama tabakasının net görünümü için numuneler zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuş ve ardından 70 ml H₃PO₄ ve 30 ml su çözeltisinde 5V ile 60 s tutulması ile dağlanmış.



Şekil 1. Çalışmada izlenen yöntemim akış şeması.

Yüzey temizleme işlemleri görmüş numuneler Q10A+Qness mikro sertlik cihazı kullanılarak Vickers sertlik testi yapılmıştır. Kullanılan deney setinde batıcı uç tepe açısı 136° olan elmas kare piramit tercih edilmiştir. Yüklü numune üzerinde durma zamanı 10 saniyedir. Test aşamasında bor tabakasından başlanıp matris malzemeye kadar sertlik değerleri ölçülmüştür. Çalışma sırasında uygulanan yük



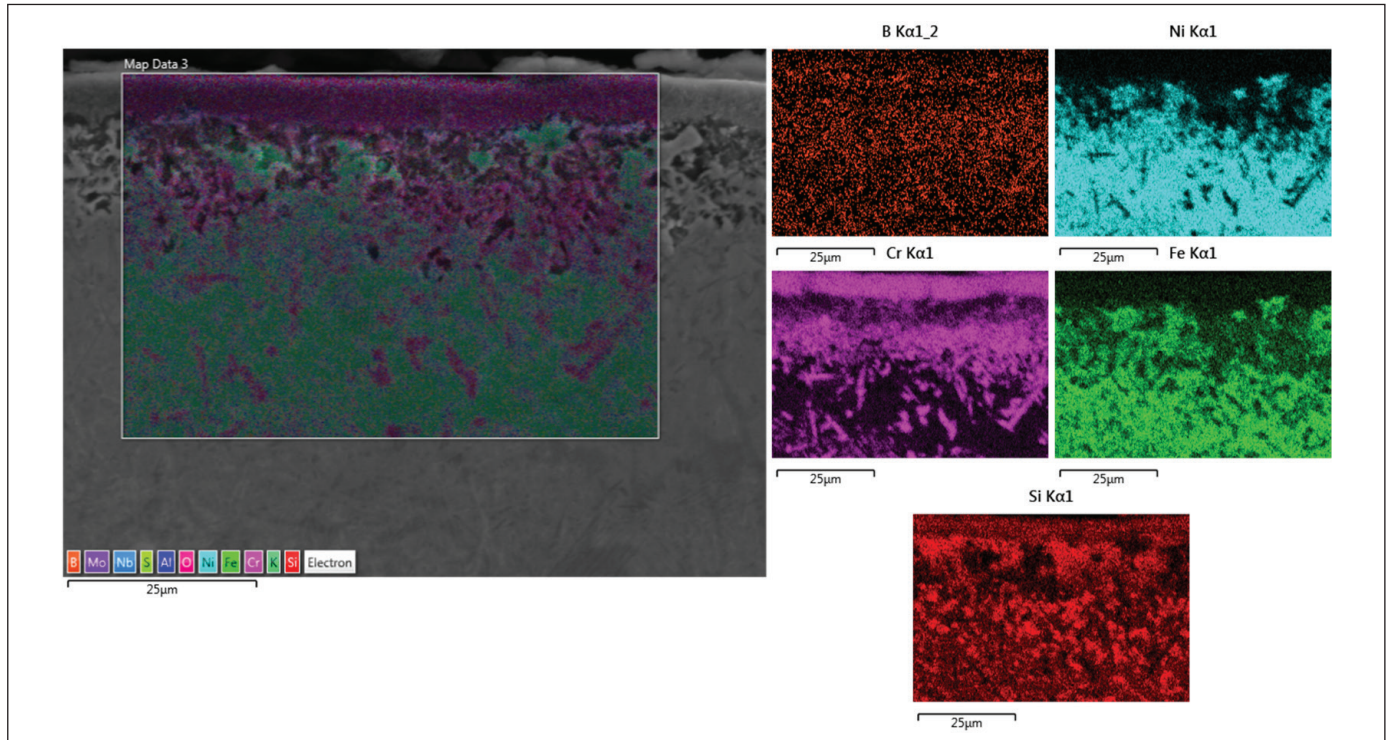
Şekil 2. 950 °C'de 4 saat borlama sonrası SEM görüntüsü.

$HV_{0.01}$ seçilmiştir. Bor kaplanmış numune içerisindeki fazların tayini için TESCAN MAIA3-XMU model taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı kullanılmıştır. Aşınma testi UTS Tribometer T10/20 cihazı kullanılarak aşınma testi 3N, 5N, 10N ve 15N yükler altında uygulanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışmalar

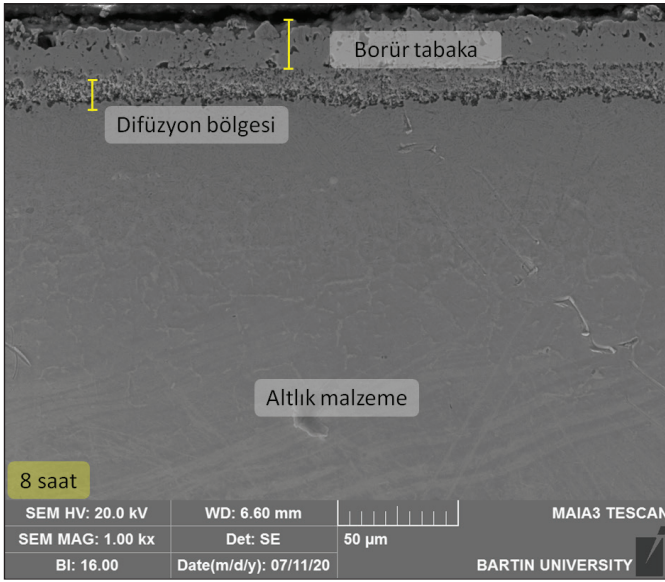
950 °C sıcaklığında 4 saat borlanması sonrasında elde edilen SEM ve haritalama EDX mikro yapı analizleri Şekil 2 ve Şekil 3'de verilmiştir. Numunelerden elde edilen en düz ve temiz olduğu görüntüler 4 saatlik borlama sonucu alınan görüntülerde elde edilmiştir. 8 ve 16 saatlik numunelerden alınan görüntülerde düzlük ve temizlik bozulmaya başlamıştır. Bu durum kaplama tabakasının yüzeyinde oluşan silisid tabakasının borun iç kısımlarına doğru difüze olmasını engellemesi ve soğuma sırasında borür fazları ile silisid içerikli fazların farklı termal genleşme katsayılarına sahip olması nedeniyle çatlak, kırılma, yapısal boşluk oluşumları vb. olumsuzlukları ortaya çıkarabilmektedir (Dinc vd. 2013). Dolayısıyla uzun işlem sürelerine bağlı difüzyon süresinin artması ile kaplanan malzeme yapısında olumsuz etkilenme gerçekleşmektedir.

Alınan SEM analiz sonucunda tabakadan matrise doğru gelindikçe bor tabakasının sürekli azaldığı bor tabakasının



Şekil 3. 950 °C'de 4 saat borlama sonrası SEM elementel haritalama mikroyapısı.

en az seviyeye indiği noktada Ni tabakasının arttığı ve Fe, Cr ve B elementlerinden oluştuğu anlaşılmaktadır (Şekil 3). Bor dağılımının oluşan tabaka etrafında yoğun bir şekilde arttığı da gözlenmektedir. Kutu borlama yöntemiyle bor kaplanmış numune yüzeyi üzerinde 950 °C sıcaklığında 8 saat borlanması sonrasında elde edilen SEM ve haritalama EDX mikroyapı analizleri Şekil 4 ve Şekil 5’de verilmektedir.

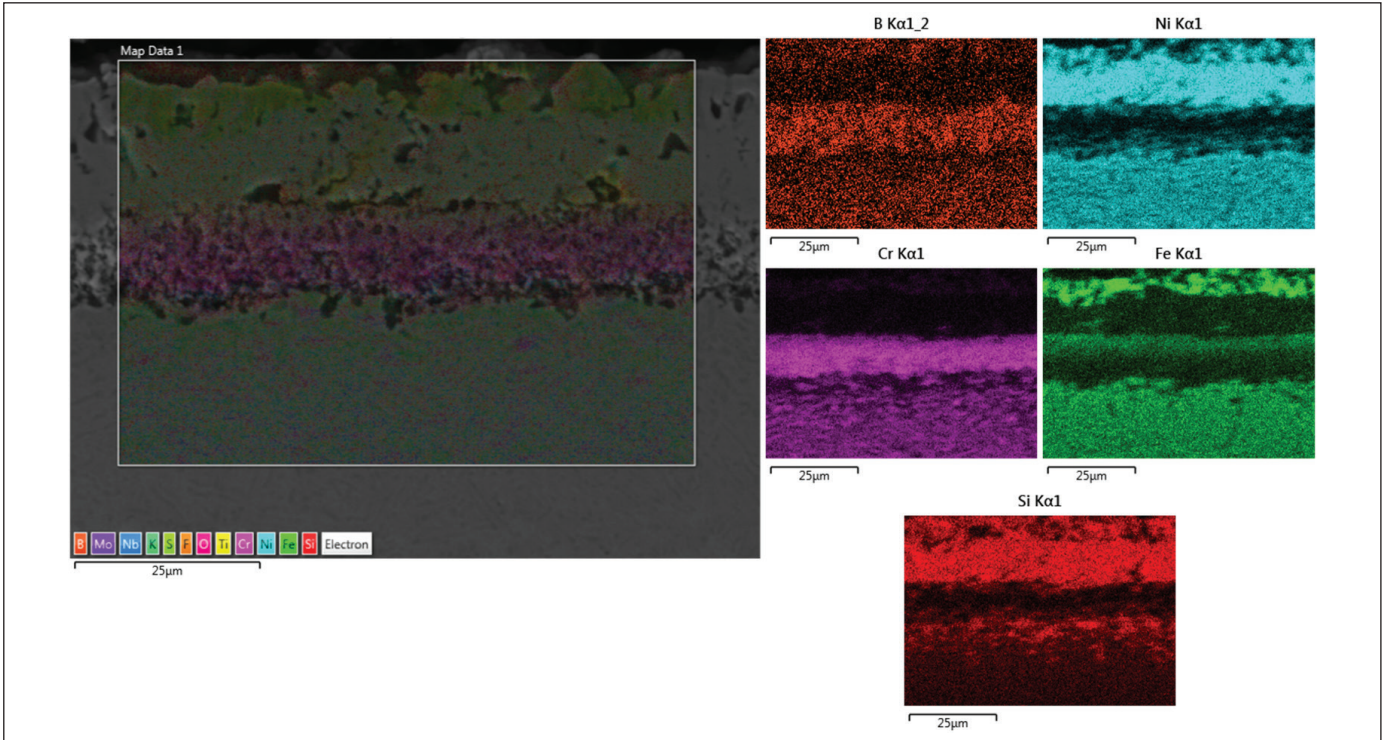


Şekil 4. 950 °C’de 8 saat borlama sonrası SEM görüntüsü.

Oluşan tabakanın 4 saat borlanmış numunedeki tabakadan daha geniş bir tabaka olduğu tespit edilmiştir. Tabakadan matrise doğru gelindikçe bor miktarının azaldığı Ni miktarının arttığı görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda bor dağılımının oluşan tabaka etrafında yoğun olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7’de verilen görüntülerde 950 °C’de 16 saat borlama sonrası alınan SEM ve haritalama EDX analizleri verilmiştir. Borun, borlama süresinin artması ile beraber difüze olmasında artış görülmektedir. Bor tabakasının çok kalın olduğu alınan SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Verilen analiz sonucunda tabakadan matrise doğru gelindikçe bor miktarının azaldığı Ni miktarının arttığı ve Fe-Cr alaşımının ana borür tabaka ile altlık arasında oluştuğu açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 7). SEM sonuçları literatür ile karşılaştırılması sonrasında literatürü destekler şekilde üç ana bölgeden oluştuğu bor tabakası, silisid tabakası ve ana malzeme olduğu elde edilmektedir (Günen 2020, Dinc vd. 2013).

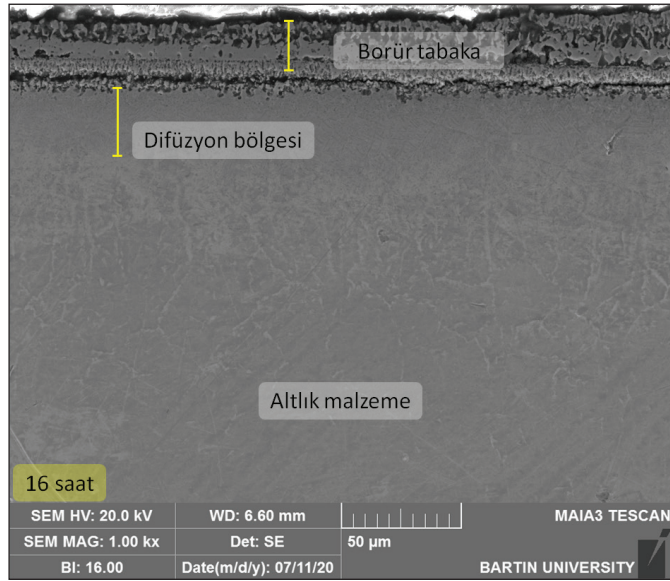
Borlanan numunelerin değişik faz işlemlerini tayin edilebilmesi amacıyla XRD analizleri yapılmış ve XRD analizi sonuçları Şekil 8’de verilmiştir.

Borlanmış numunelere yapılan XRD analizi sonucu tüm numunelerde görülen silisid tabakasının Ni_2Si , Ni_4B_3 , FeB fazla oluştuğu ve literatür ile uyumlu olduğu tespit



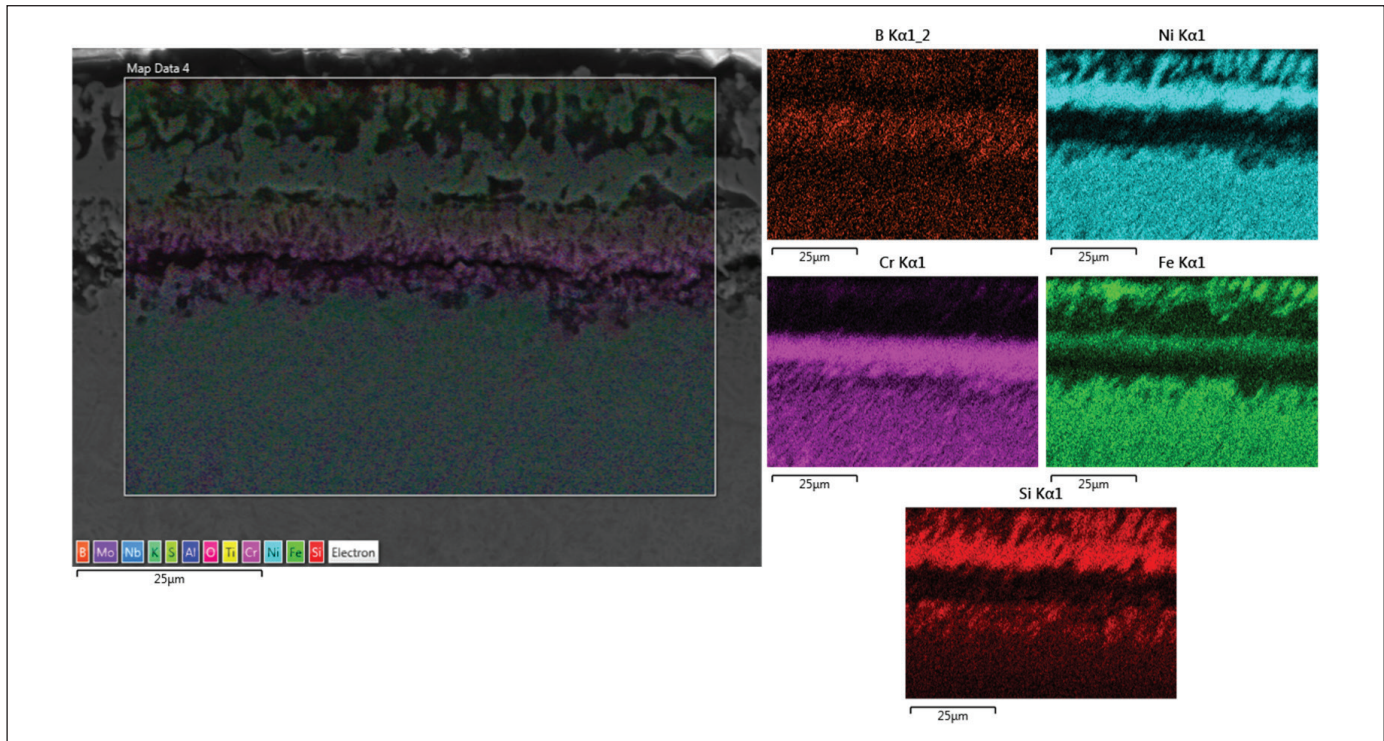
Şekil 5. 950 °C’de 8 saat borlama sonrası SEM elementel haritalama mikroyapısı.

edilmiştir (Dinc vd. 2013). Malzeme yüzeyindeki fazların zaman ile birbiri arasında farklılık gösterdiği 950 °C'de 16 saat borlanmış numunede ortaya çıkmıştır. Malzemenin süre ve sıcaklık faktörlerinin birleşmesi sonucunda yüzeyde oluşan silisid tabakası kalınlığı artmıştır. Dinc ve arkadaşları Ekabor tozu ile borlanmış Inconel 718 süperalaşımının aşınma çalışmalarında artan borlama süreleri ile birlikte

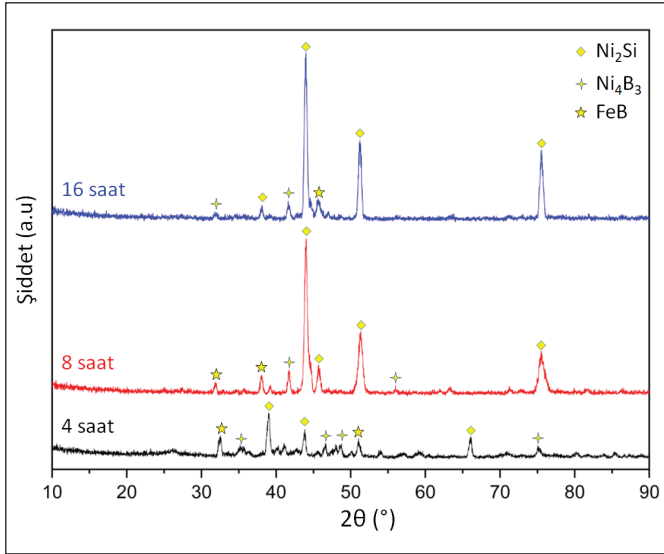


Şekil 6. 950 °C'de 16 saat borlama sonrası SEM görüntüsü.

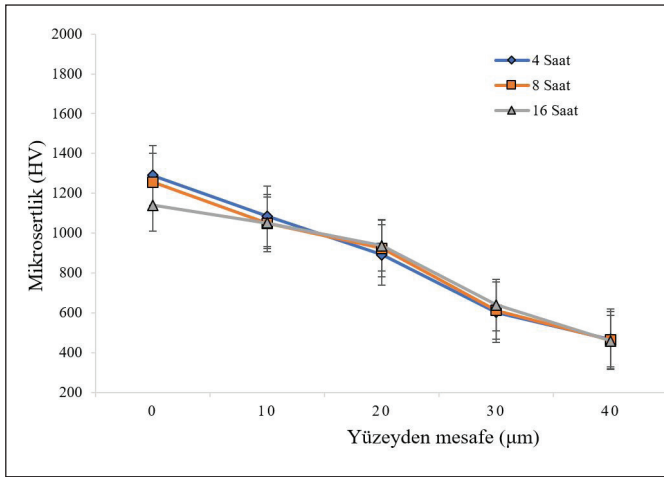
silisid tabakası kalınlıklarının arttığını bildirmişlerdir (Dinc vd. 2013). X-ışınlarının belirli bir derinliğe kadar nüfuz etmesinin bir sonucudur. 8 saatlik numunede 40-50° aralığında yüksek bir Ni₂Si fazına rastlanmıştır. 4 saatlik borlanmış numunede Ni₄B₃ fazının 30-50°leri aralığında bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Bir farklı faz olan FeB fazının 55-75°leri arasında bir dağılım göstermektedir. FeB fazı 4 saatten 16 saatlik numuneye geçince yerini Ni₂Si fazına bıraktığı tespit edilmiştir. Bu durum SEM analizlerinde görülen silisid tabakasının kalınlığının oluşumunu destekler niteliktedir. Borlama tüm numunelerde silisid fazının Ni₂Si'den, borür fazının Ni₄B₃'ten meydana geldiği görülmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak demir borür fazının FeB'den oluştuğu saptanmıştır. Oluşan tabaka kalınlıkları piklerin şiddetine etki etmektedir. Tespit edilen bu sonuç Mu ve arkadaşlarının yapmış oldukları saf nikelin borlama çalışmalarında da silisid tabakasının yüzeylerde oluştuğunu bildirmişlerdir (Mu vd. 2009). Bor bakımından daha zengin olan FeB fazı Fe₂B fazından daha kırılğan yapıdadır. Difüzyon tabakasında FeB ve Fe₂B fazlarının birlikte oluşmasının dezavantajı FeB ile Fe₂B fazlarının termal genleşme katsayıları arasındaki fark ve FeB fazının gevrekliğinden kaynaklanmaktadır. Borlama prosesi sürecinde oluşan gerilme ve artık gerilmeler sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarının temas ettikleri yüzeylerde yüzeye paralel



Şekil 7. 950 °C'de 16 saat borlama sonrası SEM elementel haritalama mikroyapısı.



Şekil 8. Inconel 718 süperalaşımının 950 °C'de 4, 8 ve 16 saat borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.



Şekil 9. Inconel 718 süperalaşımının 950 °C'de 4, 8 ve 16 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.

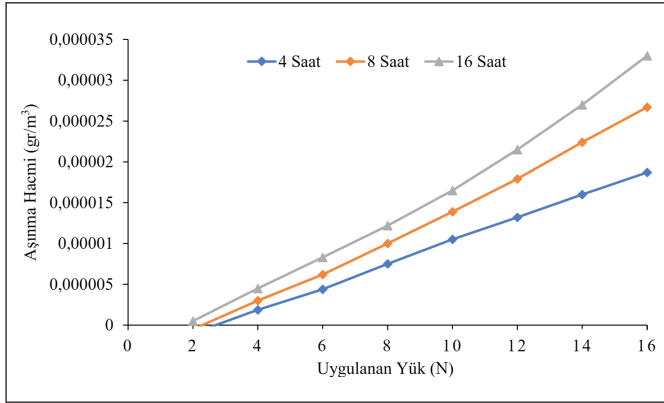
çatlaklar, tabaka ayrılmaları, ısıl değişim ve mekanik etkilere karşı dayanım daha düşük olabilmektedir (Sinha vd. 1991, Caruta 2005, Topuz 2016).

Inconel 718 süperalaşımının 950°C'de 4, 8 ve 16 saat borlanması sonucu kesit yüzeyinden matrise doğru elde edilen sertlik/mesafe grafiği Şekil 9'da verilmiştir.

Uygulanan sertlik ölçümlerinden sonra numunelerden alınan şekiller incelendiğinde, yüzeyden matrise doğru sertliğin azaldığı anlaşılmıştır. 950°C'de Inconel 718 süperalaşımının kutu borlanması sonucu elde edilen başka bir çalışmada ise benzer sonuç elde edilmiştir (Joshi vd. 2017). Saf nikelin borlandığı çalışmada sertlik, daha düşük

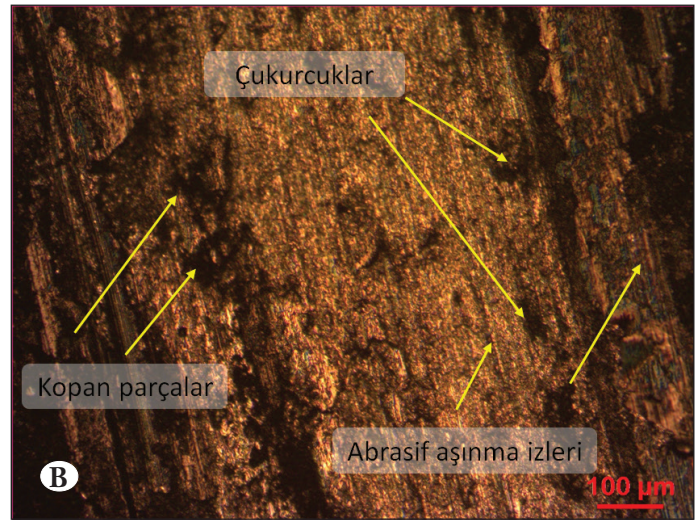
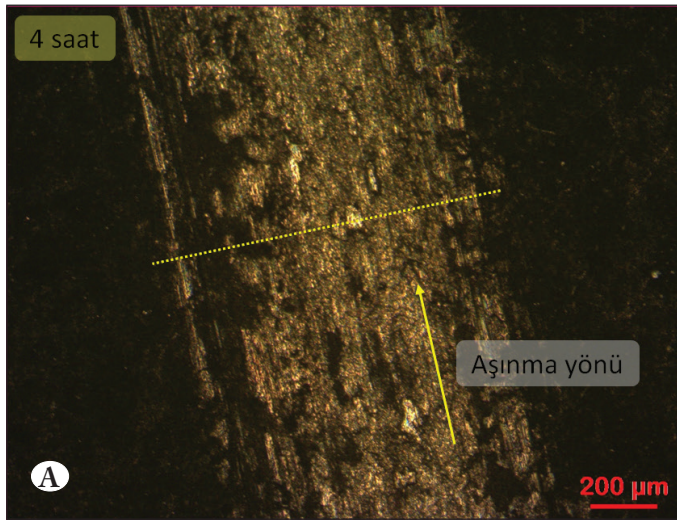
değerlerde saptanmıştır (Mu vd. 2009). Inconel 600' ve Inconel 718 farklı sıcaklık ve sürelerde borlanması sonucu benzer fazlar elde edilmiş ve aynı şekilde sertlik-mesafe profili, bu çalışmadaki profillere benzemektedir (Dinc vd. 2013, Sista vd. 2013). Sertlik değerlerindeki azalmanın kimyasal bileşimdeki farklılığa bağlı değişim gösterdiği, üst yüzeyde tamamen borür kaplama bir yapı ortaya çıkmışken, ana malzemeye doğru gidildikçe ana metal kimyasal yapıdaki alaşım elementlerine temas ile sertlik değerlerinde tabaka yapısına bağlı düşüş görülmektedir. Ana malzemenin merkezine doğru ilerledikçe sertlik değerlerinin değişimlerini gösteren grafik Şekil 9'da görülmektedir. Ayrıca, sertlik değerlerine krom (Cr) elementinin de etkili olduğu da düşünülebilir (Şekil 3, Şekil 5 ve Şekil 7). Bor tabakasından difüzyon bölgesine geçerken sertlik düşüşü çok belirginken difüzyon bölgesinden sonra o kadar fazla bir sertlik düşüşü ve matrisin kendi içerisinde de çok fazla sertlik değişim değerleri de görülmemektedir.

Aşınma değerlerinde 4 saatlik borlama işlemi sonrasında kuru kayma aşınma testlerine tabi tutulan numunede uygulanan yük ile beraber aşınma hacminin artığı tespit edilmiştir (Şekil 10). Artan yük ile birlikte ball on disk aşınma cihazındaki aşındırıcı olarak kullanılan bilyanın üzerine gelen kuvvetin artması bu bilyanın daha fazla aşığıdaki yüke batmasına sebebiyet verecektir. Bilyanın karşı yüzeye daha fazla batması önünde birikecek malzeme oranına etki etmektedir. Malzemenin aşınmasına da etkili olan batma ve kesme kuvvetleri daha fazla artacağından arttan yük ile birlikte numunedeki yük ile birlikte hacim kaybı artacaktır. Bu artışın aşındırıcı bilye (Al_2O_3) ile aşındırılan yüzey alanı arasında sıkışan partiküle uygulanan yükün artmasıyla aşındırılan malzemenin yüzeyine daha fazla temas etmesine ve batmasına yol açacaktır. Borlamanın etkisiyle numune üzerindeki sertlik ne kadar yüksek olursa kendisine batmak isteyen bilyeye göstereceği direnç fazla olacağından numune yüzeyindeki sertlik artışı aşınma direncini arttıracaktır (Baştürk ve Erten 2006, Topuz 2016). 8 saatlik borlama işleminden sonra elde edilen hacim kaybı bir önceki yani 4 saatlik borlama süresine sahip numune ile bu numune karşılaştırıldığında 4 saat borlama işleminin daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 2'de elde edilen değerler rakamsal olarak da bu sonuçları açıklamaktadır. 16 saatlik borlamanın aşınma hızının bu kadar fazla olmasının sebebi ise difüzyonun çok fazla olmasından kaynaklı ve havada soğumaya bırakılan numunelerin kaplama tabakası ve matrisin birbirinden farklı soğuma hızlarına sahip olmasından dolayı iç yapıda meydana gelen termal genleşme farklılıklarından kaynaklı gerilme, çatlak vb. durumlar

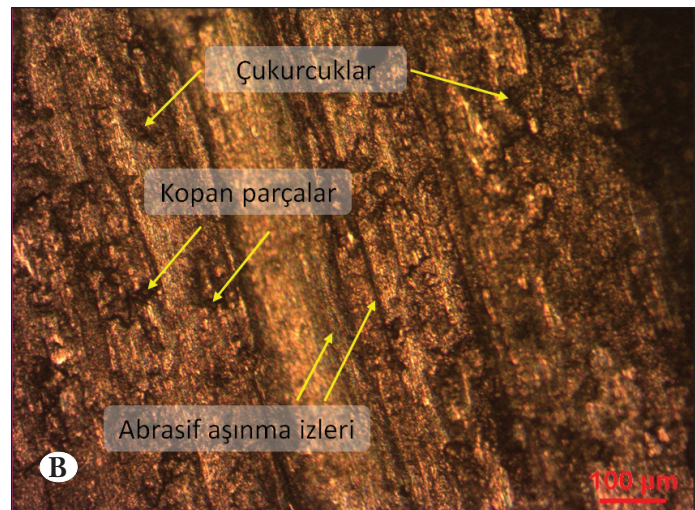
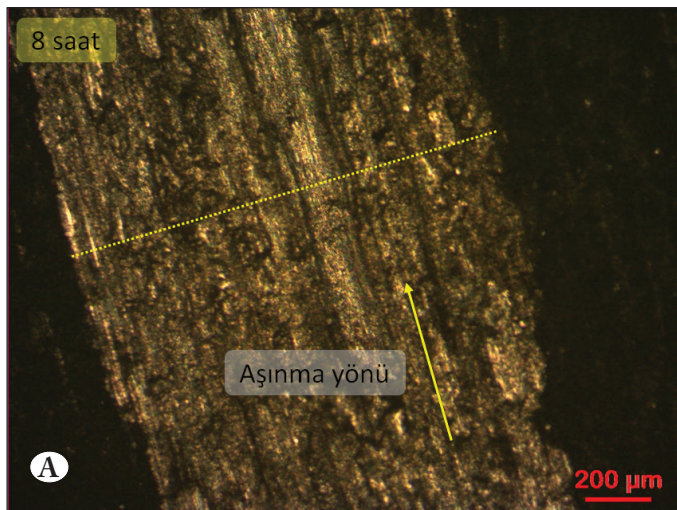


Şekil 10. 950 °C'de 4, 8 ve 16 saat borlanan numunelerin aşınma testi sonucu aşınma hacmi/uygulanan yük grafiği.

ve/veya yüzeyde meydana gelen pürüzlülük etkisine dayandırılabilir. Yüzey pürüzlülüğünün artması da borlama süresinin artması oluşumu gözlemlenen tabaka kalınlığını arttırması ile birlikte yüzey ve difüzyon bölgesi boşlukları da arttırarak tabakanın özelliklerinde azalmaya yol açar (Medvedovski vd. 2014). Farklı sıcaklık ve farklı sürelerde borlama işlemi uygulanan diğer bir çalışmada ise, yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla bor tabaka kalınlıklarının artması rapor edilmiştir (Yıldız ve Güneş 2020). Alınan optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeydeki çukurların oluşumu net bir şekilde görülmektedir (Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13). Numuneler üzerine uygulanan aşınma testi sonrasında aşınma hacmi sayısal verileri kullanılarak Şekil 10'daki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 11. 950 °C'de 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, A) 50X, B) 100X optik mikroskop görünümleri.



Şekil 12. 950 °C'de 8 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, A) 50X, B) 100X optik mikroskop görünümleri.

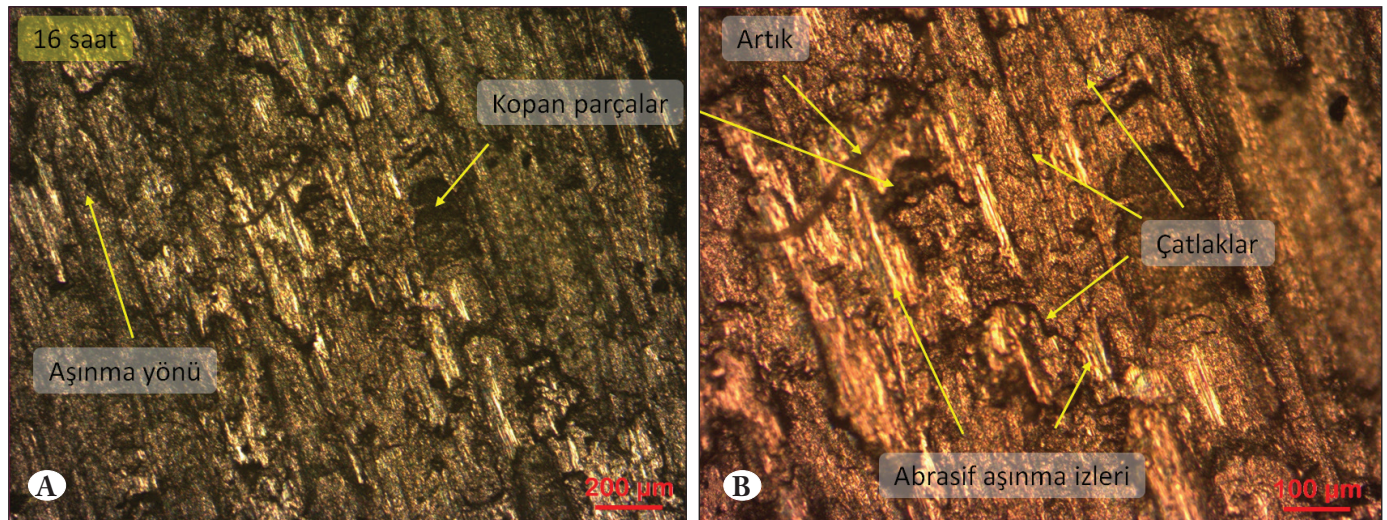
Farklı malzemelere uygulanan ve gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalarda çeliğe 900 °C'de 4 saatte uygulanan borlama işleminde elde edilen veriler, güçlü bir yüzey sertliğinin, düşük bir sürtünme katsayısı ile birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bundan dolayı elde edilen bulgular iyi bir aşınma dayanımını beyan etmektedir (Barkat vd. 2017). Şekil 10'daki grafikten elde edilen sonuçlar, sertlik sonuçları ile bağdaşmaktadır. Çalışmada, 4 saatlik numunede yükün artması ile beraber aşınma hacminin arttığı fakat en yüksek yükte dahi 8 ve 16 saatlik numunelerden daha iyi bir aşınma direnci olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 11'de 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulmuş malzemeye uygulanan aşınma testi sonrasında abrasif (abrasive) aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. Yüzeydeki

kalıntılar ve çizikler genellikle malzeme yüzeyi ile temas halinde olan aşındırıcı sert bilye tarafından oluşmuştur (Yılmaz vd. 2013). Şekil 11'a da aşınma genişliğinin çok geniş olmadığı tespit edilmiştir. Şekil 12'de de 4 saatlik borlamaya tabii tutulan malzeme gibi abrasif aşınma mekanizması tespit edilmiştir. Aşınma genişliğinin 4 saatlik malzemeye göre bir miktar arttığı da anlaşılmaktadır. Aşınma genişliğinin artmasıyla aşınma hacmi de artmıştır. Şekil 13'de ise benzer durumlar vuku bulmuştur. Artan yükte beraber çiziklerin derinlikleri ve kalınlıkları artmıştır. 950 °C'de 3 farklı zaman diliminde uygulanan borlama işlemi sonrasında malzeme yüzeylerinde incelenmek üzere uygulanan aşınma değerleri ve sertlik sonuçları tüm verileri Çizelge 2'de verilmiştir. Verilerde yüzey sertliği ve aşınma direnci en iyi olan 4 saatlik numunede bulunmuştur.

Çizelge 2. Farklı borlama sürelerine göre aşınma ve sertlik sonuçları.

Borlama Süresi	Aşınma Yüğü (N)	Aşınma Hızı (gr/m)	Ağırlık Kaybı (gr)	Tabaka Sertliği (HV _{0.01})
4 saat	3	0.000001	0.00001	1290 ± 22
	5	0.000003	0.0003	
	10	0.000011	0.0011	
	16	0.000018	0.0018	
8 saat	3	0.0000015	0.00015	1257 ± 15
	5	0.000005	0.0005	
	10	0.000015	0.0015	
	16	0.000025	0.0025	
16 saat	3	0.000003	0.0003	1140 ± 10
	5	0.000007	0.0007	
	10	0.000018	0.0018	
	16	0.00003	0.003	



Şekil 13. 950 °C'de 16 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, A) 50X, B) 100X optik mikroskop görüntüleri.

Borlama işlemi uygulanan malzemelerde oluşan yüzey tabaka özelliklerine ait gerçekleştirilen çalışmalar daha çok sertlik, korozyon ve aşınma gibi mekanizmaları incelemektedir. Çalışmalarda genel olarak sertlik değişimleri ile aşınma özelliklerinin doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür (Günen 2020). Borlama yönteminin en önemli etkisi sertlik üzerine olup, altlık malzeme özelliğine ve malzeme yüzeyinde oluşacak olan Nikel borür, krom borür ve silisid bazlı tabakalarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Krom borür ve nikel borür fazların yüksek aşınma dirençleri sağladığı belirtilirken (Gunes ve Kayali 2014, Aytekin ve Akçin 2013) silisid içerikli fazların ise aşınma direnci üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Deng vd. 2015). Borlama prosesi uygun malzeme ve uygun koşulların ayarlanması halinde sinterlenmiş karbürlerle kıyaslanabilecek düzeyde iyi aşınma direnci göstermektedir. Borlama prosesinde farklı yüklerde uygulanan aşınma testlerinde yükün artmasıyla aşınma kaybı da aynı düzeyde artmaktadır. Artan borlama süresine bağlı olarak aşınma kaybı da azalmaktadır. Güneş ve arkadaşları en az aşınma kaybını 950 °C'de 8 saatlik zaman diliminde gerçekleştirilen borlanmış numunede olduğunu bildirmişlerdir. Bu durumun sebebini borlama süresine bağlı olarak malzemenin yüzeyinde oluşan, malzemenin sertliğini ve aşınma direncini artıran FeB fazının oluşmasına bağlamışlardır (Güneş vd. 2011). Bu çalışmada karbürleme ve borlama işlemine tabi tutulmuş numunelerin tribolojik özellikleri karşılaştırılmış ve borlamaya tabi tutulan malzemelerin karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesindeki yüklemelerde abrasif aşınma dayanımı açısından daha iyi sonuçlar gözlemlenmiş ve bu özelliğini yüksek sıcaklıklarda dahi koruduğu saptanmıştır. Ağırlık kayıpları ise aşınma testinde olduğu gibi sert olan tabakanın daha az aşınmaya uğradığı ve aşınma kaybının daha az etkili olduğu belirlenmiştir.

4. Sonuçlar

Inconel 718 süperalaşım malzemeye ait 950 °C sabit sıcaklık ile 4 saat, 8 saat ve 16 saatlik zaman süreçlerinde Ekabor-II tozları kullanılarak gerçekleştirilen borlama işlemi neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Bor tabakasının en üniform yapısının 4 saatlik borlama süreci sonucunda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Inconel 718 süperalaşım altlık malzemede 8 saat ve 16 saat süre uygulanan borlama işlemi sonucunda oluşan bor tabakalarında difüzyon kaynaklı olarak yüzeyden malzeme kayıpları olduğu ve ayrıca malzeme

yüzeylerindeki bazı bölgelerin eğimli, çukurcuklu ve gözenekli yapıda oldukları görülmüştür.

2. Gerçekleştirilen aşınma testleri ve sertlik değerleri arasında bir korelasyon olduğu görülmüştür.
3. Borlama sonrasında en yüksek sertlik değeri 4 saat süre borlanmış malzemede elde edilirken, en düşük sertlik değeri ise 8 saat borlama süresine sahip malzemede elde edilmiştir.
4. Borlama işlemi sonrasında uygulanan XRD analizleri neticesinde Ni₂Si, Ni₄B₃, FeB faz yapılarının ortaya çıktığı görülmüştür.

5. Teşekkür

Yazarlar, deneysel çalışmalarda katkılarında dolayı Karabük Üniversitesi, Malzeme Araştırma Geliştirme Merkezine (MARGEM) teşekkürü bir borç bilmektedir.

6. Kaynaklar

- Akca, E., Gürsel, A., 2015.** A review on superalloys and IN718 nickel-based Inconel superalloy. *Periodicals of engineering and natural sciences*, 3(1): 15-27. <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v3i1.43>
- Aytekin, H., Akçin, Y., 2013.** Characterization of borided Incoloy 825 alloy. *Materials Design*, 50, 515-521. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.015>
- Barkat, A., Hammou, A.D., Allaoui, O., 2017.** Effect of Boriding on the Fatigue Resistance of C20 Carbon Steel. *Acta Physica Polonica A*, 132, 813-815. 10.12693/APhysPolA.132.813
- Baştürk, S., Erten, M., 2006.** Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları. *Mühendis ve Makine*, 47 (563), 57-74.
- Bochenek, K., Basista, M., 2015.** Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 79: 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.09.003>
- Bose, S., 2007.** High Temperature Coatings, 1.st Edition, Butterworth-Heinemann, Burlington, 299 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8252-7.X5000-8>
- Caruta, B., M., 2005.** Thin Films and Coatings: New Research. Nova Publishers, p. 226.
- Cataldo, J., Galligani, F., Harraden, D., 2000.** Boriding of nickel by the powder-packmethod. *Adv. Mater. Process*, 157: 35-38.
- Campos-Silva, I., Contla-Pacheco A.D., Ruiz-Rios, A., Martinez-Trinidad J., Rodriguez-Castro, G., Meneses-Amador, A., Wong-Angel, W.D., 2018.** Effects of scratch tests on the adhesive and cohesive properties of borided Inconel 718 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 349: 917-927. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.086>

- Deng, D. W., Wang, C. G., Liu, Q. Q., Niu, T. T., 2015.** Effect of standard heat treatment on microstructure and properties of borided Inconel 718. *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 25:437-443. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63621-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63621-4)
- Dinc, H., Motellabzadeh, A., Baydoğan, M., Cimenoglu, H., 2013.** Thermochemical boriding of Inconel 718 superalloy. *Academic Journal of Science*, 2(2).
- Donachie, M.J. and Donachie, S.J., 2002.** Superalloys: a technical guide, *Materials Park*, 2nd Edition, USA, ASM International, 439. 10.31399/asm.tb.stg2.9781627082679
- Dwivedi, G., Viswanathan, V., Sampath, S., 2013.** Multilayer thermal barrier coatings for gasified coal based turbine engines. *Advanced Materials and Processes*, 171: 49-51.
- Günen, A., 2020.** Properties and high temperature dry sliding wear behavior of boronized Inconel 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51(2): 927-939. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05577-3>
- Günen, A., Kanca, E., 2017.** Farklı bor kimyasalları ile borlanmış Inconel 625 alaşımının karakterizasyonu. *Pamukkale Univ. Muh. Bilim Dergisi*, 23(4): 411-416. <http://dx.doi.org/10.5505/pajes.2017.56689>
- Gunes, I., Kayali, Y., 2014.** Investigation of mechanical properties of borided Nickel 201 alloy. *Materials Design*, 53, 577-580. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.001>
- Güneş, E., Demirel Ç., Toprak, G., Çetin, M., Gül, F., 2011.** GGG50 Malzemenin Abrasif Aşınma Davranışına Borlamanın Etkisi, In 6th International Advanced Technologies Symposium, 1-5, Elazığ.
- Joshi, A. A., Singh, R. P., Hosmani, S. S., 2017.** Microstructure evolution in boronized inconel 718 superalloy. *Journal of Metallurgy and Materials Science*, 59(1): 11-21.
- Kaplanskii, Y. Y., Levashov, E. A., Korotitskiy, A. V., Loginov, P. A., Sentyurina, Zh. A., Mazalov A. B., 2020.** Influence of aging and HIP treatment on the structure and properties of NiAl-based turbine blades manufactured by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 31: 100999. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100999>
- Kuo, C. M., Yang, Y. T., Bor, H. Y., Wei, C. N., Tai, C. C., 2009.** Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering-A*, 510-511: 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.097>
- Makuch, N., Kulka, M., 2016.** Fracture toughness of hard ceramic phases produced on Nimonic 80A-alloy by gas boriding. *Ceramics international*, 42(2): 3275-3289. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.119>
- Makuch, N., 2020.** Nanomechanical properties and fracture toughness of hard ceramic layer produced by gas boriding of Inconel 600 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(2): 428-448. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65224-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65224-4)
- Makuch, N., Kulka, M., 2014.** Microstructural Characterization And Some Mechanical Properties of Gas-Borided Inconel 600-Alloy. *Applied Surface Science*, 314: 1007-1018. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.109>
- Medvedovski, E., Chinski, F.A., Stewart, J., 2014.** Wear-and Corrosion-Resistant Boride-Based Coatings Obtained through Thermal Diffusion CVD Processing. *Advanced Engineering Materials*, 16 (6), 713-728. <https://doi.org/10.1002/adem.201400090>
- Monceau, D., Oquab, D., Estournes, C., Boidot, M., Selezneff, S., Ratel-Ramond N., 2010.** Thermal barrier systems and multi-layered coatings fabricated by spark plasma sintering for the protection of Ni-base superalloys. *Materials Science Forum*, 654: 1826-1831. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.1826>
- Mu, D., Shen, B. L., Yang, C., Zhao, X., 2009.** Microstructure analysis of boronized pure nickel using boronizing powders with SiC as diluent. *Vacuum*, 83(12), 1481-1484. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.06.048>
- Saman, S., 2011.** Microstructure, Oxidation and mechanical properties of assprayed and annealed HVOF and VPS CoNiCrAlY coatings, Phd Thesis, University of Nottingham, 259 pp.
- Schulz, U., Menzebach, M., Leyens, C., Yang, Y. Q., 2001.** Influence of substrate material on oxidation behavior and cyclic lifetime of EB-PVD TBC systems. *Surface and Coatings Technology*, 146: 117-123. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01481-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01481-5)
- Sklenička, V., Kvapilov, M., Král, P., Dvořák, J., Svoboda, M., Podhorná, B., Zýka, J., Hrbáček, K., Joch, A., 2018.** Degradation processes in high-temperature creep of cast cobalt-based superalloys. *Materials Characterization*, 144:479-489. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.006>
- Subaşı, E., Kayalı, E., Baydoğan, M., 2016.** Inconel 718 süperalaşımının farklı gerilme ve sıcaklıklarda yüksek sıcaklık sürünme davranışının incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 20(1): 47-54. 10.16984/saufenbilder.29235
- Sinha A.K., 1991.** Boriding (Boronizing), ASM Handbook, Heat treating, Materials Park, OH:ASM International, vol. 4, p.437.
- Sista, V., Kahvecioglu, O., Kartal, G., Zeng, Q.Z., Kim, J.H, Eryilmaz, O.L., Erdemir, A., 2013.** Evaluation of electrochemical boriding of Inconel 600. *Surface and Coating Technology*, 215:452-459. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.083>

- Topuz, P., 2016.** DIN 1.2842 çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri. *Bor Dergisi*, 1(1), 15-19.
- Yang, X., Li, S., Qi, H., 2015.** Effect of high-temperature hot corrosion on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy. *International Journal of Fatigue*, 70: 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.011>
- Yıldız, İ., Güneş, İ., 2020.** Borlanmış %5 Mg katkılı Ni-Mg alaşımının yüzey özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 97-104. <https://doi.org/10.2339/politeknik.512600>
- Yılmaz, R., Özyürek, D., Kibar, E., 2013.** Yeniden çözeltilmeye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (2).
- Yu, B., Li, Y., Nie, Y., Mei, H., 2018.** High temperature oxidation behavior of a novel cobalt-nickel-base superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 765: 1148-1157. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.275>