

Farklı bor kimyasalları ile borlanmış Inconel 625 alaşımının karakterizasyonu

Characterization of borided Inconel 625 alloy with different boron chemicals

Ali GÜNEN^{1*}, Erdoğan KANCA²

¹Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye.
ali.gunen@iste.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye.
erdogan.kanca@iste.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.06.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 14.03.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.56689
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, nikel bazlı süper alaşımlar içerisinde endüstride yaygın olarak kullanılan Inconel 625 alaşımı 3 farklı borlama tozu ile borlanmıştır. Kullanılan borlama tozları, %90 elementel nano bor tozu + %10 NaBF₄ (NB), %90 nano hegzagonal bor nitrür tozu + %10 NaBF₄ (h-NBN) ve mikron boyutundaki ticari EKabor 2 tozlarıdır. Borlama işlemi 1000° C'de 3 sa. süre ile gerçekleştirilmiştir. Borlama işleminin ardından numuneler optik mikroskop, mikrosertlik testi ve XRD analizlerine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada, farklı kimyasal toz içeriklerinin kaplama tabakası özellikleri ve faz oluşumlarına etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde kimyasal toz bileşenlerine bağlı olarak borür, silisid ve nitrür tabakalar elde edildiği gözlemlenmiştir. Nano bor tozu ile daha yüksek bor içerikli borür fazlarının elde edilmiş olması borlama tozlarının saflık derecesinin oluşacak fazların türü üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, Ni esaslı süper alaşımlarda istenmeyen silisid tabakası oluşumu, borlama tozlarının kimyasal içeriği değiştirilerek engellenmiştir. Ayrıca, hem Ni esaslı alaşımlarda kullanılan ticari EKabor-Ni borlama tozuna alternatif olarak nano bor ve nano hegzagonal bor nitrür tozları geliştirilmiş hem de geliştirilen bu tozlarla ticari bor tozlarına göre (EKabor 2, EKabor-Ni ve B₄C) daha kalın kaplama tabakaları elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bor kimyasalları, Inconel 625, Mikroyapı, XRD

Abstract

In this study, Inconel 625 Ni-based superalloy, widely used in industrial application, was borided with three different boriding powders. The boriding powders used were as follows: the first one consists of 90% elemental nanoboron and 10% NaBF₄ (NB), the second one consisting of 90% nano hexagonal boron nitride and 10% NaBF₄ (h-NBN), and the third one being commercial EKabor 2 powder. Boriding is conducted at 1000 °C for 180 minutes. Then the borided samples were investigated with optical microscopy, microhardness test and X-Ray Diffraction (XRD) analysis. In these investigations, the effect of boriding powders with different chemical content on the properties of the coating layer and the phase formation was examined. As a result of these examinations it was observed that boride, silicide and nitride coating layers were obtained depending on the chemical content of boriding powder. The fact that the boron phases with higher boron contents were obtained with nano boron powder indicate that the degree of purity of boron powder has an effect on the type of phases to be formed. In this study, undesirable silicide layer formation encountered in Ni-based super alloys was prevented by changing the chemical composition of boriding powders. Furthermore, nano boron and hexagonal boron nitride powders, have been developed as alternative boron powders to commercial EKabor-Ni boriding powder as well as thicker coating layers have been obtained by using these newly developed boriding powders than commercial boron powders (EKabor 2, EKabor-Ni and B₄C).

Keywords: Boron chemicals, Inconel 625, microstructure, XRD

1 Giriş

Nikel esaslı alaşımlar korozyon [1]-[3] ve oksidasyona [3],[4] karşı dirençleri ile ön plana çıkmaktadır. Bundan dolayı bu alaşımlar yüksek sıcaklık ve korozyon ortam koşullarında sıklıkla tercih edilirler. Ni-bazlı süper alaşımların uygulama alanlarının başında petrol endüstrisi, kimya endüstrisi ve enerji (türbin yapımı) endüstrileri gelmektedir. Ancak, Ni bazlı süper alaşımların yüzey sertlikleri tatmin edici değildir. Dolayısıyla bu malzemeler abrazyon veya adhezyon aşınma şartlarında kullanılacak ise uygun bir aşınma önleyici gerektirmektedirler [5].

Bundan dolayı Ni bazlı süper alaşımların tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla birçok süreç geliştirilmiştir [6]-[8]. Son yıllarda plazma nitrüleme bu alaşımlara sıklıkla uygulanan yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak bu yöntemdeki uzun süre (9-40 sa.) ve buna

rağmen düşük kaplama kalınlıkları (<20 µm) bu yöntemin uygulanmasını sınırlandırmaktadır [6],[7].

Endüstriyel uygulamalar göz önünde bulundurulduğunda borür kaplamalar önemli bir yere sahiptir. Borlama termo-kimyasal bir yüzey modifikasyon metodu olup herhangi bir bor bileşiği kullanılarak yüksek sıcaklıklarda bor atomlarının malzemenin içine yayındırılmasıyla matris ile kimyasal bir bağa sahip borür fazlarının oluşumu olarak tanımlanabilir. Borlama ile yüzey modifikasyonu genellikle 700-1050 °C sıcaklık ve 30 dk. ile 12 sa. sürelerde uygulanır [9]. Borlama yöntemi olarak farklı çeşitlikte yöntemler uygulanırsa da genel olarak katı (kutu borlama), sıvı (borür tuzları içerisinde) ve gaz ortamı şekillerinde uygulanabilir. Bu yöntemler arasında kutu borlama tekniği en kullanışlı olup kutu sementasyona benzemektedir [10],[11]. Bu yöntem diğer borlama yöntemleri ile kıyaslandığında diğer yöntemlere göre daha teknolojik, basit ve ekonomikliği ile dikkat çekmektedir [12].

Borlama ısıl işleminin karakteristik özellikleri yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve tribo-korozif ortamlardaki yüksek aşınma dirençleridir. Borür tabakaları aşınma ve abrazyona karşı sinterlenmiş karbürlerle kıyaslanabilecek bir aşınma direnci gösterirler [13]-[16]. Borlama işlemi aşınma dirençleri bakımından diğer termo-kimyasal işlemlere göre çok daha iyi aşınma dirençleri sunduğu hatta borür tabakalarının nitrülenmiş, karbürlenmiş, karbo-nitrülenmiş veya krom kaplı numunelere göre 2 katı aşınma dirençleri gösterdikleri birçok çalışmada rapor edilmiştir [15]-[23].

Borlama ısıl işlemi en fazla çeliklere (düşük C'lu çelikler, C'lu çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler vs.) [21]-[23] uygulanmış olsa da demir dışı metallere (nikel, kobalt, molibden, titanyum vs.) [24]-[27] sermetlere [28] kadar birçok malzeme gurubuna uygulanmıştır. Ancak, Ni esaslı süper alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır [29]-[31]. Borlama termo-kimyasal ısıl işlemi sonucu oluşan borlama fazları borlanan malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve borlama maddesine göre değişiklikler gösterir. Ni esaslı süper alaşımlarda oluşan başlıca fazlar Ni_xB_y , Cr_xB_y , Fe_xB_y ve özellikle aşınma uygulamaları için istenmeyen Ni_xSi_y fazlarıdır [29]-[31]. CrB fazları ile 3500 HV sertlik değerleri, FeB fazları ile 2200 HV sertlik değerleri, NiB içerikli fazlar ile 1600 HV sertlik değerleri elde edilir. NiSi içerikli tabaka ise 100-500 HV sertlik değerleri elde edilir ve bu tabaka yüzeyde poroziteli şekilde bulunduğu için aşınma uygulamalarında yüzeyden kolay bir şekilde kalkar ve aşındırıcı olarak görev yapar [30]. Dolayısıyla malzemenin aşınma direncinin düşmesine neden olur.

Bundan dolayı bu çalışmada Inconel 625 alaşımının yüzeyi Ni esaslı alaşımlarda istenmeyen silisid tabakası oluşturmayacağı öngörülen 2 farklı bor kimyasalı (NB, ve h-NBN) ve daha önceki literatür çalışmalarında Ni esaslı alaşımlarda silisid tabakası oluşturduğu belirtilen ticari EKabor 2 tozu ile borlanmıştır. Böylece birçok demir esaslı ve demirdışı metallere borlanması çalışmasında [10],[13],[30],[31] kullanılan EKbor 2 tozu ile sınırlı sayıdaki çalışmada kullanılan elementel nano bor [9] ve nano hegzagonal bor nitrid tozlarının [12] Ni esaslı alaşımlar üzerindeki kaplama karakteristiklerinin belirlenmesi ve birbirleriyle kıyaslanması amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada, Ni esaslı süper alaşımlardan biri olan Inconel 625 10x10x5 mm ebatlarında hassas kesme tezgâhında kesilmiştir. Ardından borlama ısıl işlemi için önemli olduğundan yüzeydeki kir pas vb. istenmeyen tabakalar 1200'lük SiC zımpara ile giderilmiştir. Borlama toz harmanı olarak NB, h-NBN ve ticari EKabor 2 tozu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Inconel 625 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1'de, borlama toz harmanları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Bor elementinin oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan bor oksijen ile reaksiyona girerek hemen oksitlenir. Bu istenmeyen oksitlenmeyi engellemek için kesilen alaşım parçaları ve bor tozları AISI 304 paslanmaz çeliğinden imal ettirilen potalar içerisine Glovebox sistemi aracılığıyla Ar gazı ortamında yerleştirilmiştir. Ardından hava ile temasın engellenmesi için pota ağız sıkıca kapatılmış ve potalar 1000 °C'de ısıl işlem için hazır şekilde tutulan fırının içine bırakılmıştır. Borlama ısıl işlemi 3 sa. süre ile gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda fırından alınan potalar hava ortamında soğutulmuş numunelerin yüzeyindeki aktivatör tozundan kaynaklı yapılmalar (kalıntılar) fırçalama tekniği ile giderilmiştir.

Metalografik muayeneler için 10x10x5 mm boyutlarındaki numunelerin dikdörtgen kesit bölgelerindeki kaplamalar görünecek halde sıcak kalıplama (bakalit) işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan numunelerin kesit yüzeyleri parlatma cihazı ile sırasıyla 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500'lük SiC zımpara kağıdı ile zımparalanmış ardından numunelerin önce 1 µm alümina pasta sonrasında ise 1 µm elmas pasta ile parlatma işlemleri yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler %5 nitrik asit, %10 asetik asit ve %15 hidroklorik asit çözeltisi ile 4 dk. süresince dağlanarak mikroyapılar ortaya çıkarılmıştır.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan Inconel 625 alaşımının kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)										
Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Al	Ti	Si	Diğer
58	20	5	8	4.15	1	0.5	0.4	0.4	0.5	2.05

Tablo 2: Deneylerde kullanılan bor harmanları ve karakteristikleri.

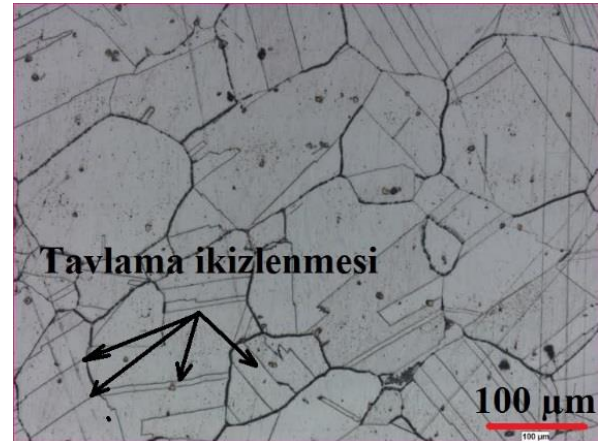
Bor Tozu	Tane Ebatı	Mohs Sertliği	Bileşimi
NB	10-50 nm	9.3	%90 Nanobor %10 NaBF ₄
h-NBN	50-100 nm	2	%90 HBN %10NaBF ₄
EKabor 2	<1400 µm	-	%5 B ₄ C %90 SiC %5 Ekrit

Daha sonra numuneler optik mikroskopu ve taramalı elektron mikroskop (SEM) ile incelenmiştir. Borlama işlemiyle oluşturulan borür kaplamaların tabaka kalınlıkları Nikon MA-200 mikroskopu üzerindeki Clemex analizi programı vasıtasıyla ölçülmüştür. Aynı şekilde borlanmış alaşımların mikrosertlik incelemeleri Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı vasıtasıyla 100 gf yük ve 10 sn. süre beklenerek gerçekleştirilmiştir. Numunelerin XRD analizleri bilgisayar kontrollü Rigaku DMAX II RadB-XRD Cu K α ışını ($\lambda_{Cu}=0.1540$ nm) ve 2 θ açısı ile 10-90° aralığında taranarak gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular

3.1 Metalografik inceleme

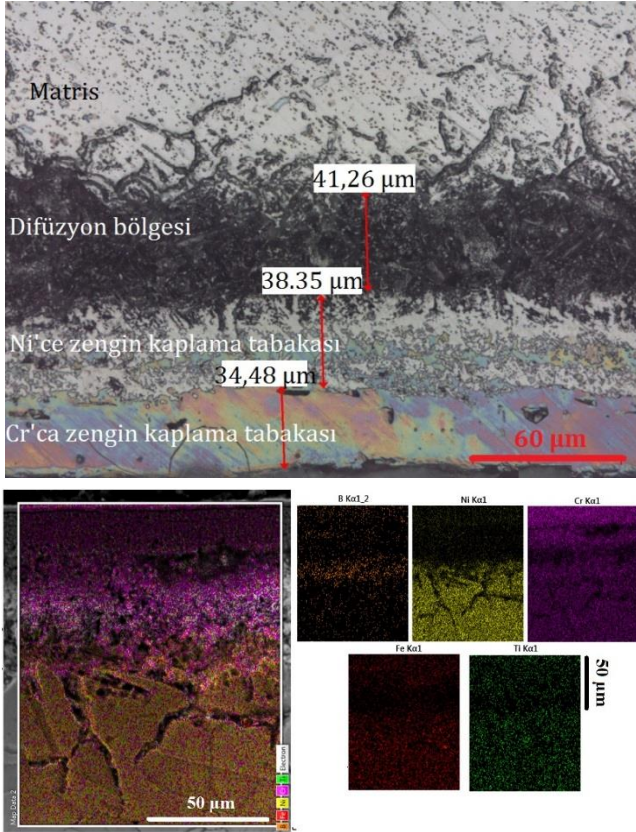
Şekil 1'de herhangi bir kaplama işlemi uygulanmayan Inconel 625 alaşımının mikroyapısı görülmektedir.



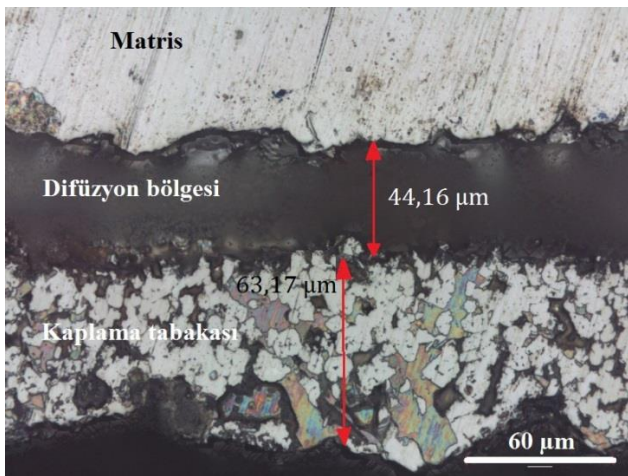
Şekil 1: Inconel 625 alaşımının optik görünümü.

Şekil 1 incelendiğinde, yüzey merkez kübik yapıya sahip metal ve alaşımlarda sıkça karşılaşılan ikizlenme mekanizmalarından biri olan tavlama ikizlenmesi açık bir şekilde görülmektedir. Tavlama mekanizması mikroskop altında incelendiğinde tane boyunca uzanan düz sınır çizgileri ile karakterize edilir (Şekil 1).

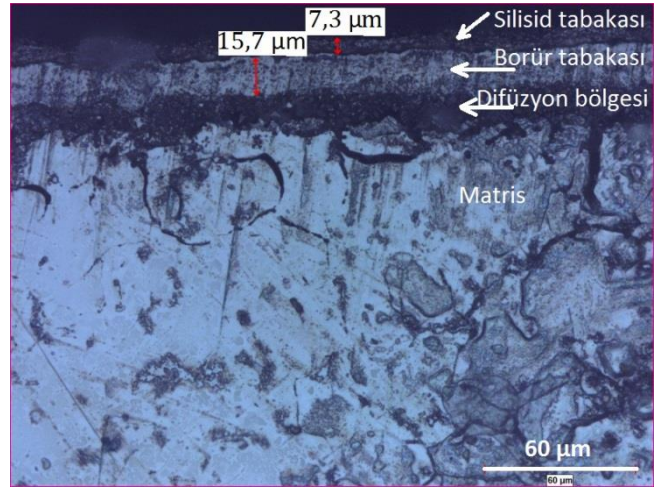
1000 °C'de 3 sa. süre ile NB, h-NBN ve EKabor 2 tozları ile borlanmış numunelerin mikroyapıları görüntüleri sırasıyla Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 2: 1000 °C'de NB tozu ile 3 sa. sürede borlanmış numunenin. (a): Optik görünümü, (b): Alaşım elementlerinin borlama işlemi sonrası dağılımı.



Şekil 3: 1000 °C'de h-NBN ile 3 sa. sürede borlanmış numunenin optik görünümü.



Şekil 4: 1000 °C'de EKabor 2 tozu ile 3 sa. sürede borlanmış numunenin optik görünümü.

Şekil 2'den görüldüğü üzere numunede 4 farklı bölge görülmektedir. Bu bölgeler aşağıdan yukarıya matris, difüzyon bölgesi Ni'ce zengin borür tabakası ve Cr'ca zengin borür tabakasıdır. Bu bölgelerin varlığı EDS analizleri ile desteklenmiştir. Sinha (1991) çeliklerde bu durumu kromun atom numarası (24) demir (26) ve nikelnden (28) düşük olması sebebiyle borca en zengin olan (Fe, Cr)B'ye öncelikli olarak matristen faza girerek yüzeye doğru yayılmasından kaynaklanmasına bağlamıştır [13]. Bu sayede malzemenin yüzeyi çok daha sert alt katmanlar ise sertliği giderek azalmıştır.

Şekil 3'te ise matris, difüzyon bölgesi ve çok fazlı kaplama tabakası (borür ve nitrür fazları) bölgeleri görülmektedir. Bu numunedeki borür fazlarının yanında nitrür fazlarının oluşumu kullanılan borlama malzemesinin h-NBN olmasından dolayıdır. NB ile kaplanan numunede görülen Cr'ca ve Ni'ce zengin bölgeler şeklinde bir ayrım h-NBN ile borlanan numunelerde tespit edilmemiştir. Öte yandan nitrür fazlarının oluşumu XRD analizleriyle desteklenmiştir.

Şekil 4'te ise matris, difüzyon bölgesi, borür tabakası ve silisid tabakasından olmak üzere 4 kısımdan oluşmuştur. Silisid tabakası kullanılan ticari EKabor 2 tozu içeriğindeki SiC'den kaynaklanmıştır. Silisid tabakasının varlığı Ni Esaslı süper alaşımların borlanmasında daha önceki literatür çalışmalarında da belirlenmiştir.

Bu tabaka literatürde ilk olarak Hunger ve Trute (1994) tarafından ileri sürülmüş ve bu tabakanın Ni bazlı alaşımlarda EKabor içeriğindeki Si'e bağlı olarak meydana geldiği ve borür tabakalarının büyümesini engellediğini belirtmişlerdir [32]. Muhammad ve diğ. (1999) bu tabakanın oluşumunu şu şekilde ifade etmişlerdir. 600 °C'nin üzerinde SiC ile ortamdaki O₂'nin reaksiyonu sonucu (oksitletme) yüzeyde SiO₂ oluştuğu, bunun akabinde ise oksit tabakasının aktivatörün (KBF₄) ayrışması sonucu ortaya çıkan BF₃ ile reaksiyona girerek koruyucu tabakayı ortadan kaldırdığı ve SiC tekrardan oksidayona maruz bırakması sonucu Ni ile Ni₃Si₂ oluşturan SiF₄ gazının oluşumuna bağlamışlardır [29]. Silisid tabakasının yüzeyde düşük sertlik (100-500 HV) değerinde olmasından dolayı istenmeyen bir tabakadır. Deng ve diğ. (2014) borlanmış 718 Inconel alaşımına ısıl işlemin etkilerini inceledikleri çalışmalarında Silisid tabakasının yalnızca 500 HV sertlikte olduğu ve aşınma direnci uygulamalarında bu tabakanın önceden kaldırılması gerektiğini belirtmişlerdir [31]. Baydoğan

ve diğ. (2015) Ekabor tozu ile borlanmış Inconel 718 süper alaşımının aşınma dirençlerini inceledikleri çalışmalarında artan borlama süreleri ile birlikte silisid tabakası kalınlıklarının arttığı, aşınma işlemi sonucu silisid tabakasının kalktığı ve malzemenin yüzeyinden daha çok parça kaldırdığını belirtmişlerdir [30].

3.2 Tabaka kalınlığı ve mikrosertlik değerleri

Borlanmış numunelerin kesit yüzeylerinden alınan kaplama tabakası kalınlığı ve mikrosertlik değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Kaplama tabakası kalınlığı ve difüzyon bölgesinin genişliği açısından değerlendirdiğimizde nanobor tozu ile yapılan kaplamanın 72.83 μm , difüzyon bölgesinin ise 41.26 μm ile en yüksek, Ekabor 2 tozu ile ise 15.7 kaplama tabakası ve 10.2 difüzyon bölgesi oluşumu ile en düşük kaplama tabakasının meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum difüzyona bağlı işlemlerde tane boyutunun küçülmesi ile yüzey alanının artması sonucunda difüzyon olayını hızlandırdığını göstermektedir. Bu durum tane boyutunun küçülmesi ile temas yüzeyinin artması sonucu yayılım işleminin kolaylaşmasına atfedilebilir. Böylece nano boyuta sahip tozlarda toz partikül boyutuna bağlı olarak difüzyon işlemi çok daha hızlı gerçekleşeceğinden daha kalın kaplamalar elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

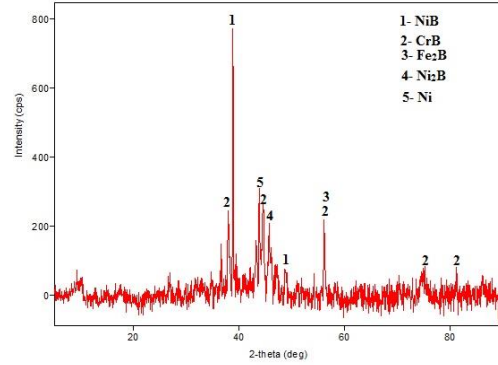
Farklı özelliklerde oluşan kaplama tabakalarından alınan mikrosertlik değerleri incelendiğinde ise en yüksek sertlik değerlerinin Nanobor ile kaplanan numunenin Cr'ca zengin borür tabakasından elde edildiği, en düşük sertlik değerinin ise h-NBN ile kaplanan numunede olduğu görülmektedir (Tablo 3). En yüksek sertlik değerinin Cr'ca zengin tabakadan elde edilmesi bu numunede oluşan CrB ve Cr₂B fazlarının bu bölgelerde yüksek oranda oluşmasının sonucudur. Çünkü CrB fazının sertlik değeri 3500 HV iken NiB fazı 1600 HV ve FeB fazı ise 2200 HV'ye kadar ulaşabilir [13]. En düşük sertlik değerinin h-NBN ile kaplanan numunede elde edilmesi bu tabaka içerisinde borür fazlarının yanında nitrür fazlarının oluşumundan kaynaklanmıştır. Bu durum XRD analizleri ile de desteklenmiştir. EKabor tozu ile elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde yüzeyde 472.5 HV olan silisid tabakasının altında yaklaşık 1750 HV borür tabakası elde edildiği ve bu durumun literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Ticari Inconel 625 alaşımının sertlik değerinin 260 HV olduğu göz önünde bulundurulduğunda borlama işlemi sonu 5.5 ile 8.3 kat aralığında sertlik artışı meydana geldiği bu sertlik artışının aşındırıcı veya yapışkan aşınma koşullarında aşınma direncine olumlu katkıda bulunacağı öngörülmektedir.

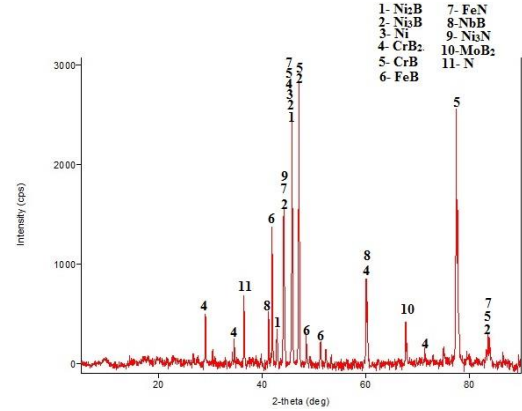
3.3 XRD analizleri

Farklı bor toz harmanları ile borlanmış numunelerin yüzeyinde oluşan kaplama tabakalarındaki fazların belirlenmesi amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizleri bilgisayar kontrollü RIGAKU D/MAX-2200 cihazıyla CuK α radyasyon (X-ışını)

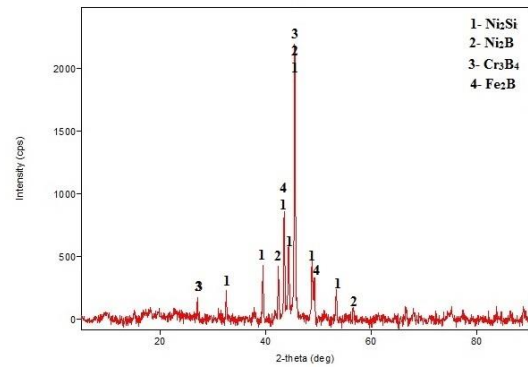
kullanılarak 10-90° aralığı taranarak gerçekleştirilmiştir. Nanobor, h-NBN ve EKabor 2 tozu ile borlanan numuneler sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 5: 1000 °C ve 3 sa. süresince NB tozu ile borlanmış Inconel 625 alaşımının XRD analizi.



Şekil 6: 1000 °C ve 3 sa. süresince h-NBN tozu ile borlanmış Inconel 625 alaşımının XRD analizi.



Şekil 7: 1000 °C ve 3 sa. süresince EKabor 2 tozu ile borlanmış Inconel 625 alaşımının XRD analizi.

Tablo 3: 1000 °C ve 3 sa. süresince farklı borlama toz harmanları ile borlanmış numunelerin kaplama tabakası kalınlıkları ve maksimum sertlik değerleri.

Borlama Tozları	Nanobor			h-NBN			EKabor 2	
	Cr _x By	NixBy	Difüzyon Bölgesi	Borür ve Nitrür tabakası	Difüzyon Bölgesi	Silisid Tabaka	Borür Tabaka	Difüzyon Bölgesi
Tabaka Kalınlığı (μm)	34.48	38.35	41.26	63.17	44.16	7.29	15.69	10.2
Mikrosertlik (HV _{0.1})	2167.8	1829.3	492.3	1453.2	385.6	472.5	1750.7	402

Nanobor tozu ile borlanan numunenin xrd analizleri incelendiğinde baskın fazın CrB olduğu buna ilaveten NiB, Ni₂B, Fe₂B fazlarının yanında Ni fazına da rastlanmıştır. Bu numunedeki elde edilen yüksek sertlik değeri CrB fazına atfedilebilir. Çünkü, EDS haritalaması ile de belirlenen Cr'ca zengin bölgede 2167 HV civarındaki sertlik değeri elde edilir iken Ni'ce zengin borür tabakasında sertlik değerleri 1800 HV civarında tespit edilmiştir.

h-NBN tozu ile borlanan numunenin XRD analizleri incelendiğinde (Şekil 6) ise borür fazlarına ilaveten nitrür fazlarının meydana geldiği görülmektedir. Nitrürler borürlere göre daha düşük sertliğe sahip fazlardır. Bu durum sertlik değerlerine yansımıştır. Çünkü kaplama tabakası EKabor 2 tozuna göre daha kalın olmasına rağmen mikrosertlik değeri daha düşük olarak tespit edilmiştir. Ayrıca bu numunenin sertlik çalışmaları sırasında birbirinden farklı sertlikte bölgelere rastlanmış ve kaplama tabakasından alınan 10 sertlik değerinin ortalaması alınarak sertlik değeri belirlenmiştir.

Ni esaslı alaşımları EKbor 2 tozu ile borlayan birçok araştırmacı XRD analizleri neticesinde çeşitli silisid fazları ve borür fazları elde ettiğini belirtmişlerdir. Ancak, Güneş ve Kayalı (2012) borlanmış Nikel 201 alaşımının mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarındaki XRD analizleri incelendiğinde araştırmacıların silisid fazını saptamadıkları görülmüştür [33]. EKabor 2 tozu ile borlanan numunede literatürde çoğu araştırmacının belirtmiş olduğu üzere Silisid tabakası (Ni₂Si) elde edilmiştir. Bunun altında da Nanobor tozu ile elde edilen borür fazlarına göre daha az bor içeren Ni₂B ve Cr₃B₄ fazları elde edilmiştir. Bu durum oluşan borür fazları üzerinde borlama maddesi saflık derecesinin etkili olduğunu göstermektedir.

4 Sonuçlar

Ni- esaslı süper alaşımlardan olan Inconel 625 alaşımı 1000 °C'de 3 sa. süre ile NB, h-NBN ve EKabor 2 tozları ile borlanmıştır. Yapılan çalışma Ni esaslı alaşımlar üzerinde nano bor ve hegzagonal bor nitrür tozları ile kaplama elde ilk çalışma özelliğini taşımaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Farklı içerikli kaplama tozları ile farklı faz özelliklere sahip kaplama tabakaları elde edilmiştir.
2. Kaplama tabakasından elde edilen kalınlıklar NB, h-NBN ve EKabor 2 tozları için sırasıyla yaklaşık 73, 63 ve 16 µm olarak elde edilmiştir. Kullanılan borlama tozunun tane boyutu ile kaplama kalınlığının ters orantılı olduğu görülmüştür,
3. Maksimum sertlik değerlerine borür tabakalarında ulaşılmış olup sertlik değerleri nanobor tozu için 2167, h-NBN tozu için 1453 ve EKabor 2 tozu için ise 1750 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür,
4. XRD analizleri sonucunda Nanobor tozu ile borür, h-NBN tozu ile hem borür hem de nitrür, Ekabor 2 tozu ile ise silisid ve borür içerikli fazlara sahip kaplama tabakaları elde edilmiştir. Nano bor tozu ile daha yüksek bor içerikli borür fazlarının elde edilmiş olması borlama tozları saflık derecesinin oluşacak faz türü üzerinde etkili olduğunu göstermiştir,
5. Silisyum içeriksiz kaplama tozları vasıtasıyla Ni-esaslı alaşımların kaplamalarında istenmeyen Silisid

tabakası oluşumu engellenmiş ve EKabor-Ni patentli ticari borlama tozuna alternatif sunulmuştur,

6. Borlama işleminde nm boyutlu bor tozlarının kullanılması µm boyutlu bor tozlarına göre zaman, enerji ve maliyet açısından avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

5 Kaynaklar

- [1] Ueda N, Mizukoshi T, Demizu K, Sone T, Ikenaga A, Kawamoto M. "Boriding of nickel by the powder-pack method". *Surface Coating Technology*, 126, (1), 25-30, 2000.
- [2] Lou DC, Solberg JK, Akselsen OM, Dahl N. "Microstructure and property investigation of paste boronized pure nickel and Nimonic 90 superalloy". *Materials Chemical Physics*, 115(1), 239-244, 2009.
- [3] Petrova RS, Suwattanont N, Pallegar KK, Vangaveti R. "Boron coating to combat corrosion and oxidation". *Corrosion Reviews*, 25, 555-569, 2007.
- [4] Zhao S, Xie X, Smith GD. "The oxidation behavior of the new nickel-based superalloy Inconel 740 with and without Na₂SO₄ deposit". *Surface Coating Technology*, 185(2-3), 178-183, 2004.
- [5] Makuch N, Kulka M. "Microstructural characterization and some mechanical properties of gas-borided Inconel 600-alloy". *Applied Surface Science*, 314, 1007-1018, 2014.
- [6] Aw PK, Batchelor AW, Loh NL. "Structure and tribological properties of plasma nitrided surface films on Inconel 718". *Surface Coating Technology*, 89(1-2), 70-76, 1997.
- [7] Sun Y. "Kinetics of layer growth during plasma nitriding of nickel based alloy Inconel 600". *Journal of Alloys and Compounds*, 351(1-2), 241-247, 2003.
- [8] Kost M, Rudnicki J, Wierzcion T. "Glow discharge treatment of Inconel 625 for glass fibreizing spinner discs". *Journal of Material Design and Application*, 222(4), 241-243, 2008.
- [9] Günen A, Kanca E, Demir M, Er Y, Sağlam G, Gök MS. "Micro-abrasion wear behavior of fast borided steel tooth drill bits". *Tribology Transactions*, 60(2), 267-275, 2017.
- [10] Uslu İ, Cömert H, İpek M, Özdemir Ö, Bindal C. "Evaluation of borides formed on AISI P20 steel". *Materials and Design*, 28(1), 55-61, 2007.
- [11] Bayca SU, Şahin S. "Borlama". *Mühendis ve Makine*, 532, 51-59, 2004.
- [12] Günen A, Çarboğa C, Kurt B, Orhan N. "Borlama işleminde kullanılan bor tozu tane boyutunun kaplama tabakası üzerine etkisi". *Nevşehir Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1) 12-19, 2013.
- [13] Sinha AK. Boronizing, ASM Handbook, Heat Treatment section 4: OH, USA, 1991.
- [14] Wiercho'n T., Boenig H.V. (Editor). *Advances in Low-temperature Plasma Chemistry, Technology, Applications*, Vol. 2, Lancaster-Besel, USA, Technomic Publishing Company Inc, 1988.
- [15] Venkataraman B, Sundararajan G. "The high speed sliding wear behaviour of boronized medium carbon steel". *Surface Coating Technology*, 73(3), 177-184, 1995.
- [16] Hunger HJ, Trute G. "Boronizing to produce wear-resistant surface layers". *Heat Treatment of Metals*, 21(2), 31-39, 1994.
- [17] Kaouka A, Allaoui O, Keddou M. "Properties of boride layer on borided SAE1035 steel by molten salt". *Applied Mechanical Materials*, 467, 116-121, 2014.

- [18] Kartal G, Timur S, Sista V, Eryilmaz OL, Erdemir A. "The growth of single Fe₂B phase on low carbon steel via phase homogenization in electro-chemical boriding (PHEB)". *Surface Coating Technology*, 206(7), 2005-2011, 2011.
- [19] İpek M, Çelebi G, Özbek İ, Zeytin S, Bindal C. "Investigation of boronizing kinetics of AISI 51100 steel". *Journal Materials Engineering Performance*, 21(5), 733-738, 2012.
- [20] Campos-Silva I, Flores-Jiménez M, Rodríguez-Castro G, Hernández-Sánchez E, Martínez-Trinidad J, Tadeo-Rosas R. "Improved fracture toughness of boride coating developed with a diffusion annealing process". *Surface Coating Technology*, 237, 429-439, 2013.
- [21] Kulka M, Makuch N, Pertek A, Piasecki A. "An alternative method of gas boriding applied to the formation of borocarbonized layer". *Materials Characterizations*, 72, 59-67, 2012.
- [22] Wang B, Jin X, Xue W, Wu Z, Du J, Wu J. "High temperature tribological behaviors of plasma electrolytic borocarbonized Q235 low-carbon steel". *Surface Coating Technology*, 232, 142-149, 2013.
- [23] Özdemir Ö, Omar MA, Usta M, Zeytin S, Bindal C, Üçışık AH. "An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel". *Vacuum*, 83(1), 175-179, 2009.
- [24] Güneş İ, Keddam M, Chegroune R, Özçatal M. "Growth kinetics of boride layers formed on 99.0% purity nickel". *Bulletin Materials Science*, 38 (4), 1113-1118, 2015.
- [25] Dong Mua B, Yanga C, Shena B, Jiangc H. "Oxidation resistance of borided pure cobalt". *Journal of Alloys and Compounds*, 479 (1-2), 629-633, 2009.
- [26] Hausner HH. *Coating of High Temperature Materials*. New York, USA, Springer Science and Business Media, 1966.
- [27] Ataibiş V, Taktak Ş. "Characteristics and growth kinetics of plasma paste borided Cp-Ti and Ti6Al4V alloy". *Surface and Coatings Technology*, 279, 65-71, 2015.
- [28] Karakan M, Alsaran A, Çelik A. "Plazma borlama". *Mühendis ve Makine*, 43(512), 51-54, 2002.
- [29] Muhammad W, Hussain K, Tauqir A, Ulhaq A, Khan AQ. "Evaluation of halide-activated pack boriding of INCONEL 722". *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30A, 670-674, 1999.
- [30] Baydoğan M, Dinç H, Motellabzadeh A, Çimenoglu H. "Thermochemical boriding of inconel 718 superalloy". *Academic Journal of Science*, 2(2), 385-389, 2013.
- [31] Deng D, Wang C, Liu Q, Niu T. "Effect of standard heat treatment on microstructure and properties of borided Inconel 718". *Transactions Nonferrous Materials Society China*, 25(2), 437-443, 2015.
- [32] Hunger HJ, Trute G. "Successful boronizing of nickel based alloys". *Materials Science Forum*, 163-165, 341-348, 1994.
- [33] Güneş İ, Kayalı Y. "Investigation of mechanical properties of borided Nickel 201 alloy". *Materials and Design*, 53, 577-580, 2014.