

AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin yüzey özelliğinin borlama ile geliştirilmesi

Gökhan BAŞMAN*, M. Kelami ŞEŞEN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D. Malzeme Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Borlama, metallerde sert yüzeyler elde etmek amacıyla uygulanan en önemli termokimyasal yüzey işlemlerinden biridir. Borlama işlemi gaz borlama, tuz banyosunda elektrolizle veya elektrolizsiz olarak ve kutu borlamayı içeren farklı şekillerde gerçekleştirilebilir. Borür tabakaları malzeme yüzeyine oldukça yüksek sertlik ve korozyona karşı dayanım sağlar. Bu çalışmada, 850°C, 950°C ve 1050°C sıcaklıklarda 2.4, ve 6 saat sürelerde kalsine borik asit, kalsine boraks ve silisyum karbür içeren tuz banyosunda termokimyasal borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L tipi paslanmaz çeliğin yüzey özellikleri incelenmiştir. Borlama işleminden sonra, çelik yüzeyinde oluşan borür fazları ve borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları X – ışınları analizi ile, borlanmış yüzeyin yapısı ışık ve elektron mikroskobu ile, borlanmış yüzeyin pürüzlülüğü pürüzlülük cihazı ile incelenmiştir. Oluşan borür tabaka kalınlıkları artan sıcaklık ve artan süre ile parabolik olarak artmıştır. Borlanmış numunenin yüzeyindeki borür tabakası kompakt ve düz bir tabakaya sahiptir. Borlamada oluşan borür tabakalarında sadece Fe₂B fazı oluşmuş, FeB fazı oluşmamıştır. Borlanmış numunede oluşan borür tabakasının oluşum aktivasyon enerjisi 231.886 kJ/mol olarak bulunmuştur. Borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları, borlama sıcaklığının 850°C'den 1050°C'ye yükselmesiyle artmaktadır. Borlama sıcaklığının artmasıyla pürüzlülük değerleri artmaktadır. Ancak, borlama süresinin pürüzlülüğe etkisinde herhangi bir ilişki bulunmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Borlama, Paslanmaz çelik, borür tabakası, kalıntı gerilme, aktivasyon enerjisi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Gökhan BAŞMAN gbasman@gmail.com; Tel: +90 (533) 522 58 57.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "AISI 316L tipi paslanmaz çeliğin termokimyasal difüzyon yöntemi ile borlanmasında, borlama banyosu bileşenlerinin borür tabakası özelliklerine etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 24.02.2010 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 08.04.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Başman, G., Şeşen, M. K., (2011) 'AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin yüzey özelliğinin borlama ile geliştirilmesi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 2, 115-121" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

The improvement of the surface properties of AISI 316L type stainless steel by boronizing

Extended abstract

Austenitic stainless steels represent an important class of materials which possess excellent cryogenic properties and good high-temperature strength. Their mechanical properties are comparable to those of mild steels but offer an excellent general corrosion resistance in the atmosphere, in many aqueous media and oxidizing acids. Particularly, the addition of molybdenum in type 316L provides pitting resistance in phosphoric and acetic acids and chloride solutions, as well as corrosion resistance in sulphurous acid. However, in general, stainless steels are characterized as having relatively poor wear resistance. This fact has led to the development of a number of surface treatments in order to improve their tribological performance without compromising their corrosion resistance, such as nitriding by ion implantation, pulsed plasma nitriding and plasma immersion ion implantation, boronizing. Also, it has been well documented that it is possible to extend the service life of many different parts and components, made of relatively soft substrates, subjected to corrosion and wear, by means of the use of thin hard films such as oxides, nitrides and carbides applied onto their surfaces. However, since such parts could also be subjected to cyclic loading during service, it is of almost importance to evaluate the effect of such hard films on the fatigue properties of the coated substrate, an area which has become an important research topic in the past few years. Mainly, AISI 316 L type steels are used in biomedical applications, automotive industry, ship industry, HVAC (heat ventilation air condition climate) systems and pressure vessel systems.

Different superficial hardening processes are commonly applied to metals. Those are generally limited by the metal's original chemical composition as well as the required mechanical properties. Thermochemical methods, for which the superficial composition is locally modified, can produce microstructures and mechanical properties that are completely different from those of the basic metal. atoms and those of the basic metal leads to the formation of new compounds in the superficial layer.

Boriding or boronizing is a thermochemical surface hardening technique used for boride-type coating

that can be applied to a large range of materials (ferrous metals, non-ferrous metals and cermets). Boriding can be performed in numerous ways, including gas boriding, molten salt boriding, with and without electrolysis, and pack boriding. The produced layers provide an extremely high hardness, good tribological properties and anti-corrosion resistance of the treated surfaces. It is a surface treatment process in which boron atoms are diffused into the material surface between 800 and 1100 °C. A boride layer with hardness (HV) of 1600–2000 forms by penetrating and diffusing boron to the surface. Boronizing is a prominent choice for a wide range of tribological applications where the control of friction and wear is of primary concern. Boronizing being a thermochemical diffusion treatment can be applied to a wide range of steel alloys including carbon steel, low alloy steel, tool steel and stainless steel. Borides are non-oxide ceramics and could be very brittle.

The aim of this study is to clarify the improvement of surface properties of AISI 316 L type stainless steel by thermo-chemical boronizing technique. In this study, boronizing bath was consisting of mixing of the silicon carbide, borax and boric acid in the salt bath. Boronizing process were performed different temperature and time. After the boronizing process, the various tests to determine the properties of boride layer were done.

The results of this investigation can be summarized as follows, a) Thickness of boride layer on the surface of boronized AISI 316 L stainless steel increased as a parabolic with increasing temperature and time, b) The boride layers of boronized samples show continuity the surface. The surface structure of boride layer is more homogeneous and more density, c) The basic phase for the boride layer occurred with boronizing technique was Fe_2B . The FeB did not occur, d) Activation energy of boride layer occurred with boronizing was 231.886 kJ/mol, e) The surface roughness values of boronized samples increased both the increasing additive ratio and increasing boronizing temperature. There is not affair to the effect on the roughness of the boronizing time and the type of the additives, The residual stress of boride layer increased with increasing temperature.

Keywords: Boronizing, stainless steel, boride layer, surface roughness, residual stress, activation energy.

Giriş

Östenitik paslanmaz çelikler yüksek sıcaklıklara dayanımı ve korozif ortamlara direnci açısından mühendislik uygulamaları için önemli malzemelerdir. Mekanik özellikleri yumuşak çeliklerle kıyaslanırsa de atmosferik korozyona dirençleri ve birçok oksitleyici asitlere karşı dayanımı mükemmeldir. Özellikle, 316 L tipi çelikteki molibden, çeliği fosforik asit, asetik asit ve klor çözeltilerindeki çukurcuk korozyonuna karşı dayanımını artırır. Genel olarak, paslanmaz çelikler düşük aşınma ve galling dayanımlarıyla karakterize edilirler. Bu durum yüzey performansını korozyon özelliklerini etkilemeden artırmak için, iyon implantasyonu ile nitrürleme, plazma nitrürleme ve borlama gibi birçok yüzey geliştirme işlemlerine olanak sağlamıştır (Dearnley ve Adrich-Smith., 2004).

Yumuşak malzemelerden yapılmış parçaların, yüzeylerine korozyon ve aşınmaya karşı oksit, nitrür ve karbür gibi sert film kaplayarak, servis ömürlerinin artırılabilirdiği bilinmektedir. Bununla birlikte birçok parça, kullanımı sırasında tekrarlı yüklere maruz kalmaktadır. Bu tür sert kaplamaların, malzemelerin yorulma davranışı üzerine etkilerini belirlemek gerekir Son yıllarda bu tür etkileşimleri belirleme çalışmaları önemli hale gelmiştir (Nosai vd., 2004).

AISI 316 L tipi paslanmaz çelik malzemeler aşınmaya, yorulmaya ve korozyona dayanıklı yerlerde özellikle; tarımsal, endüstriyel ve konutsal sektörde su sirkülasyonlarında, agresif olmayan kimyasal sıvılarda, basınçlı su sistemlerinde, büyük ölçekli sulama sistemlerinde, endüstriyel yıkama sistemlerinde, ısıtma ve soğutma sistemlerinde, otomotiv endüstrisinde (Katalitik konvertörün gövdesi ve turbo besleme gövde), gemi endüstrisinde (filtre ızgarası, boru hatları, filtreler) ve tıp alanında (implant malzeme olarak) kullanılmaktadır (Nosai vd., 2004).

Kuvvetli aşındırıcı koşullarda aşınmaya dirençli olan östenitik paslanmaz çeliklerin, daha yumuşak aşındırıcı koşullarda aşınmaya direnci düşüktür. Paslanmaz çelikler ilaç, gıda ve yem endüstrisindeki dozajlama sistemlerinde zayıf

aşındırma koşullarında ve sarsıntılı olarak çalışırlar. Gemi endüstrisinde paslanmaz çeliklerden yapılan şaftlar da dinamik çalışmanın yanında, denizel ortamının korozif ve erozif aşınma etkilerine maruzdurlar. İnsan vücudunda kullanılan paslanmaz çeliklerden yapılan implant ürünler de, vücut ortamının korozif etkisi altında sürekli hareket halindedirler (Nosai vd., 2004).

Bu ve bunun gibi endüstri dallarında kullanılan paslanmaz çeliklerin aşınmaya ve korozyona dirençli hale getirilmesi için yüzeylerinin geliştirilmesi başvurulan uygulamalardır. Borlama bu yüzey işlemlerinden biridir.

Paslanmaz çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirmede kullanılan borlama yöntemi, sert yüzeyler elde etmek amacıyla uygulanan en önemli termokimyasal yüzey işlemlerinden biridir. Farklı malzemelere (demir, demir dışı ve sermet) uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama işlemi gaz borlama, tuz banyosunda elektrolizle veya elektrolizsiz olarak ve kutu borlamayı içeren farklı şekillerde gerçekleştirilebilir. Elde edilen tabakalar malzeme yüzeyine oldukça yüksek sertlik, gelişmiş yüzey özellikleri ve korozyona karşı dayanım sağlar. Borlama işlemi 1023 ve 1373 °K sıcaklıkları arasında yapılmaktadır Yüzeye difüze olan bor atomları ile yüzeyde 1600–2000 HV sertlik elde edilmektedir (Yapar vd., 2004; Sinha, 1991).

Bor atomlarının malzeme yüzeyine difüzyonu ile gerçekleşen borlama işleminde, demir bor denge diyagramına göre demir kristal kafesine difüze olan bor iki tip demir borür oluşturmaktadır: FeB ve Fe₂B. FeB fazının daha kırılğan olması ve aralarındaki termal genişleme katsayısı farkının yüksek olması nedeniyle genellikle tek fazlı Fe₂B borür tabakası tercih edilmektedir. Tek fazlı Fe₂B tabakası endüstriyel uygulamalarda da FeB içeren çift fazlı tabakadan daha çok tercih edilmektedir. Tek fazlı Fe₂B tabakası iyi derecede aşınma direncine ve mekanik özelliklere sahiptir. Borürler oksit olmayan seramiklerdir ve çoğu kez kırılğandır. Genellikle, borür çelik ara yüzeyi, düşük ve orta karbonlu çel-

likler için kolonsal yapıdayken, yüksek alaşımli çeliklerde düz bir yapıya sahiptir (Brackman vd., 1989; Palombarini ve Carbucicchio, 1984).

Bu çalışmada, AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin yüzey özelliklerinin termokimyasal borlama işlemiyle geliştirilmesi incelenmiştir.

Materyal ve yöntem

Bu çalışmada kullanılan AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi Tablo.1’de verilmiştir. Borlama işlemlerinde atmosfer kontrollü Heraeus marka elektrik direnç fırını kullanılmıştır. Fırının sıcaklık hassasiyeti ± 5 °C’ dir.

Tablo 1. AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.015	0.45	1.5	0.026	0.028	16.98	10.2	2.07

Deneyler argon gazı atmosferinde yapılmıştır. Borlama işleminde, pota olarak AISI 304 paslanmaz çelik potalar kullanılmıştır.

Borlama işlemi, kalsine borik asit (B_2O_3) ve kalsine boraks ($Na_2B_4O_7$)’tan oluşan banyo bileşimine, %25 oranında silisyum karbür katkı maddesi ilave edilerek tuz banyosunda gerçekleştirilmiştir. Çalışma, 850 °C, 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda ve 2, 4, ve 6 saat sürelerde yapılmıştır.

Borlama işlemi sonrasında numuneler oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Borlama sonrası numune yüzeyinde kalan kalıntılar, numuneler kaynayan sıcak suda bekletilerek uzaklaştırılmıştır. Daha sonra numuneler alkol içerisinde ultrasonik olarak temizleme işlemine tabi tutulmuşlardır.

Optik incelemeleri clemex image analiz programına sahip bilgisayar kontrollü Nikon Epiphot 200 marka ışık mikroskobu ile, Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri JEOL JSM-840 marka cihaz kullanılarak yapılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü “S 8P Perthometer” marka yüzey profilometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

X-ışınları analizleri PHILIPS PW 3710 marka x-ışınları difraktometresi kullanılarak, JADE Materials Data XRD Pattern Processing V5.0.2195(2) Service Pack 2 ve ICDD veri tabanı ile yapılmıştır. Analiz sırasında $Co K\alpha$ ($\lambda=1.79021$ Å) ışın demeti ve 2θ (10-90°) açıları kullanılmıştır.

Borlama işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan kalıntı gerilmeleri, X-ışınları difraksiyon analizi (XRD) tekniği ile XSTRESS 3000 G2/G2R X-ray gerilme analiz cihazı ve X3000 V1.22a veri tabanı ile yapılmıştır. Analiz sırasında $CrK\alpha$ ($\lambda=0.22897$ Å) ışın demeti ve 2θ (156.4°/211°) açıları kullanılmıştır.

Deneysel çalışma sonuçları

Borür tabaka kalınlıkları sıcaklık ve süreye bağlı olarak 7.95-73.92 μm arasında değişiklik göstermiştir. Tablo 2’de elde edilen tabaka kalınlıkları verilmiştir. Tabaka kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığına bağlı değişimi Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 2. Borlanmış paslanmaz çeliğin borür tabakasının süreye ve sıcaklığa göre kalınlıkları

Borlama Sıcaklığı (°C)	Tabaka Kalınlığı (μm) Borlama Süresi (saat)		
	2	4	6
850	7.95	9.20	12.83
950	15.30	24.40	27.10
1050	31.94	52.53	73.92

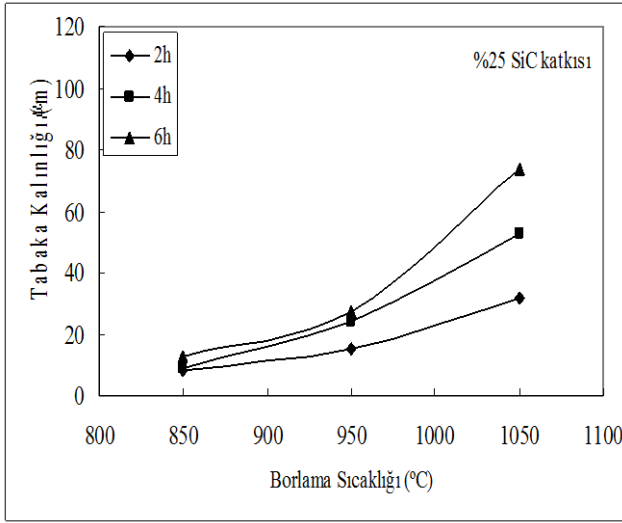
Borlama tabakasının kalınlığı borlama süresi ile parabolik olarak artmıştır. Borlama işlemi sonrasında, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak yüzeyden itibaren farklı yapılar gözlemlenmiştir.

Bunlar;

(a) kompakt ve düz bir tabaka şeklindeki ve bileşiminde borür fazlarını içeren borür tabakası bölgesi,

- (b) borca zengin olan ve tane yapısı ana matristen farklı geçiş bölgesi,
(c) çelik matris' dir.

Birçok çalışmada, saf demir ve sade karbonlu çeliklerde borür tabakasının dış şekilli oluştuğu (Palombarini vd., 1984), ancak, alaşımlı çeliklerde ise, alaşım elementine bağlı olarak, borür tabakasının, dış şekilli oluşmadığı ve düzlemsel yapıda oluştuğu belirtilmektedir (Carbucchio vd., 1987).

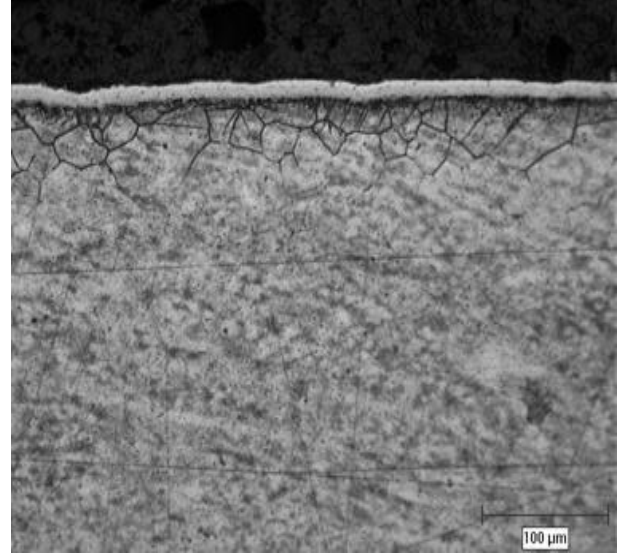


Şekil 1. Borlanmış paslanmaz çeliğin borür tabakası kalınlığının borlama sıcaklığına göre değişimi

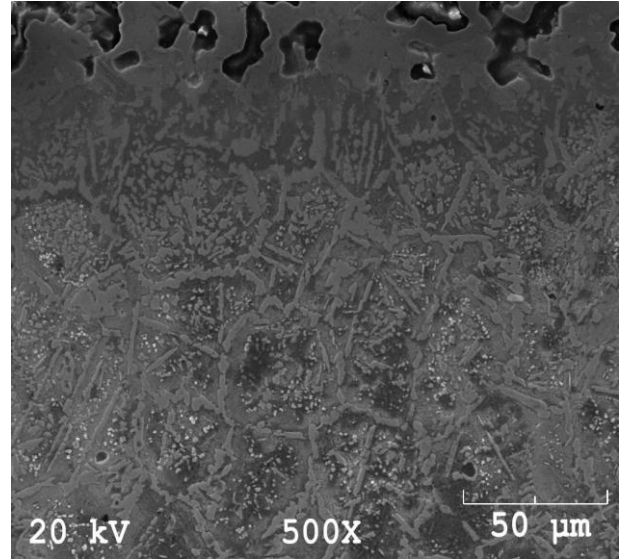
Şekil 2(a-b)'de 850 °C'de 6 saat borlanan AISI 316L çelik malzemesinin kesitine ait ışık mikroskobu ve 1050°C'de 6 saat borlanan AISI 316L çelik malzemesinin kesitine ait SEM görüntüleri verilmiştir.

Şekil 3'te de 1050°C'de 6 saat süre ile yapılan borlamada numunenin geçiş bölgesinde oluşan difüzyon tabakasının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekillerden, çalışılan AISI 316L paslanmaz çelikte borlama ile oluşan borür tabakasının düzlemsel olduğu görülmektedir.

Yüksek oranlarda alaşım elementi içeren AISI 316L paslanmaz çelikte yapılan borlama ile oluşan borür tabakası literatüre uygun olarak düzlemsel şeklindedir.



(a)

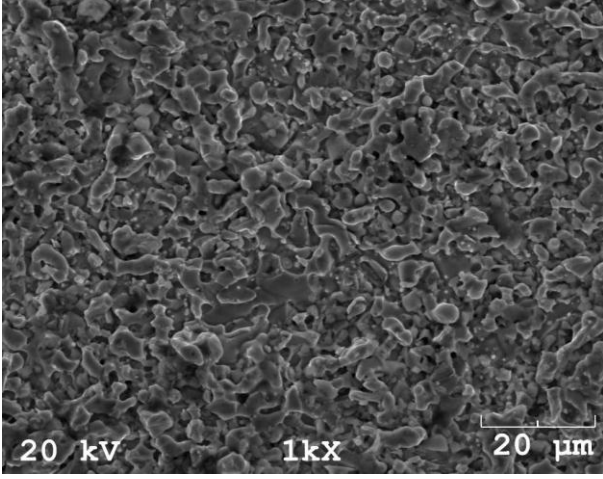


(b)

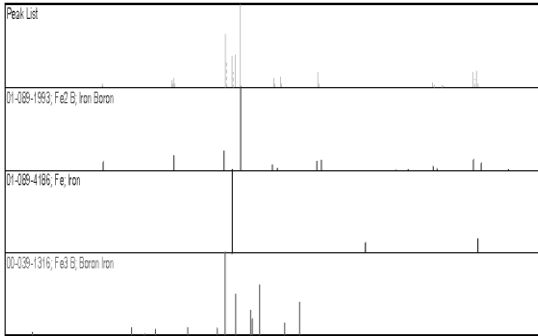
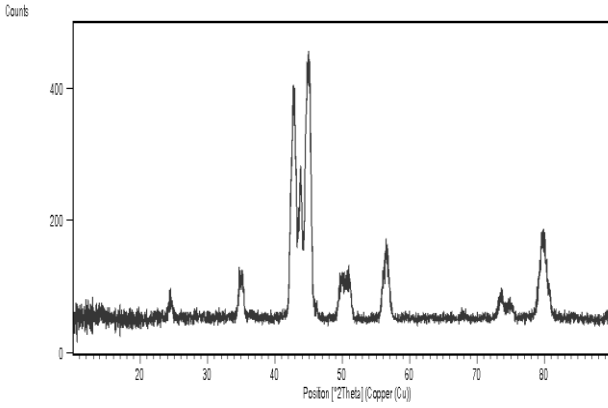
Şekil 2. (a) 850°C'de 6 saat süre ile borlanan AISI 316L çeliğinin yüzeyinin ışık mikroskop görüntüsü (b) 1050°C'de 6 saat süre ile borlanan AISI 316L çeliğinin geçiş bölgesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Borlanan tüm numunelerde borür tabakası yüzeyde süreklilik göstermektedir. Borür tabakasının yüzey yapısı; homojen, yoğun ve ince tanelidir.

1050°C'de 6 saat borlanmış AISI 316L tipi çeliğin x ışınları difraksiyon paterni Şekil 4'te verilmiştir. Borlamada oluşan borür tabakasında, Fe₂B ve Fe₃B fazlarının oluştuğu, FeB fazının oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 3. 1050°C'de 6 saat süre ile borlanan numune yüzeylerinde oluşan borür tabakasının SEM görüntüleri



Şekil 4. 1050°C'de 6 saat süre ile borlanmış AISI 316 L tipi çeliğin X ışınları difraksiyon paterni

Borlamanın kinetiğinin incelenmesine ilişkin olarak Brakman vd. (1989) tarafından geliştirilen matematiksel model kullanılmıştır. Bu modelde

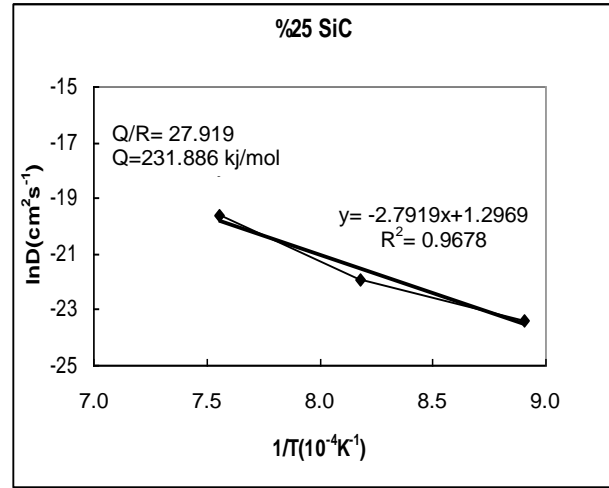
borür tabakası kalınlığının süreyle değişimi temel alınmış ve ifade aşağıdaki eşitlikle verilmiştir.

$$d^2 = D.t \quad (1)$$

Burada d borür tabakası kalınlığı (cm), D tabakanın büyüme hız sabiti ve t süre (s) dir.

Borür tabakasının büyümesini etkileyen temel faktör tabaka içerisindeki borun difüzyonudur. Bu açıdan büyüme hız sabiti (D), aktivasyon enerjisi (Q) ve sıcaklık (T) arasındaki ilişki Arrhenius bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (2)$$



Şekil 5. Borlanmış AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin borür tabakasının oluşumuna ilişkin Arrhenius grafiği

Elde edilen tabakanın büyüme hız sabiti değerleri aktivasyon enerjisi hesaplamaları için Arrhenius ifadesinde yerine konmuş ve Şekil 5'de verilen lnD-1/T eğrisi çizilmiştir. Bu doğrunun eğimi borlanmış tabakanın oluşum aktivasyon enerjisi değerini vermektedir. Bu değer 231.886 kJ/mol 'dır.

%25 SiC banyo katkılı borlanmış 316 L çelik numune için bor difüzyon katsayısı aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$D = 3.66 \exp(-27.919/T) \quad (3)$$

850, 950 ve 1050°C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri; Ra pürüzlülük değeri, olarak ölçülmüş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3'den de görüleceği gibi numunelerde borlama sıcaklığının artmasıyla pürüzlülük değerleri artmaktadır. Ancak, borlama süresinin pürüzlülüğe etkisinde ilişki bulunmamaktadır.

Tablo 3. Borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	Yüzey Pürüzlülük (µm)
850	2	0.33
	4	0.27
	6	0.20
950	2	0.40
	4	0.50
	6	0.60
1050	2	0.60
	4	0.73
	6	1.10

6 saat süre ile borlanan numunelere ait kalıntı gerilme miktarları Tablo 4'te verilmiştir. Borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları borlama sıcaklığının artması ile artmaktadır.

Tablo 4. Borlanmış numunelerin borür tabakasındaki kalıntı gerilme değerleri

Borlama Süresi (saat)	Borlama Sıcaklığı (°C)	Kalıntı Gerilme, MPa
6	850	-405.2
	950	-865.6
	1050	-1241.2

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Borlamada oluşan borür tabakasının kalınlığı; artan sıcaklık ve artan süre ile parabolik olarak artmaktadır.

- Borlanan tüm numunelerde borür tabakası yüzeyde süreklilik göstermektedir. Borür tabakasının yüzey yapısı, homojen, yoğun ve ince tanelidir.
- Borlamada oluşan borür tabakalarında sadece Fe₂B fazı oluşmuş, FeB fazı oluşmamıştır.
- Borlamada oluşan borür tabakanın oluşum aktivasyon enerjisi 231.886 kJ/mol'dır.
- Borlama sıcaklığının artmasıyla pürüzlülük değerleri artmaktadır. Ancak, borlama süresinin pürüzlülüğe etkisinde herhangi bir ilişki bulunmamaktadır.
- Borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları genel olarak borlama sıcaklığının 850°C'den 1050°C'ye yükselmesiyle artmaktadır.

Kaynaklar

- Brakman, M., Gommers, A.W.J., Mittemeijer, J., (1989). Boriding of iron and Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni Alloys: Boride layer kinetics, *Materials Research*, **23**, 3061-3066.
- Carbucicchio, M., Palombarini, G., (1987). Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings, *Journal of Materials Science Letters*, **6**, 1149-1145.
- Dearnley, P. A., Adrich-Smith, G., (2004). Corrosion-wear mechanisms of hard coated austenitic 316 L stainless steels, *Wear*, **256**, 491-499.
- Nosei, L., Avalos, M., Go'mez, B.J., Nachez, L., Feugeas, J., (2004). Stability under temperature of expanded austenite developed on stainless steel AISI 316L by ion nitriding, *Thin Solid Films*, **468**, 134, 141.
- Palombarini, G., Carbucicchio, M., (1984). On the morphology of thermochemically produced Fe₂B/Fe interfaces, *Journal of Materials Science Letters*, **3**, 791-794.
- Sinha, A.K., (1991). *ASM Handbook-4*, 437, ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- Yapar, U., Başman, G., Arısoy, C.F., Yeşilçubuk, A., Şeşen, M.K., (2004). The influence of boronizing on mechanical Properties of EN-C35E steel, *Key Engineering*, **264-268**, 629-632.
- Yapar, U., Arısoy, C.F., Başman, G., Yeşilçubuk, S.A., Şeşen, M.K., (2004). Surface Modification of EN-C35E Steels by Thermochemical Boronizing Process and Its Properties, *Key Engineering*, **264-268**, 633-636.