

Comparison of Boriding Heat Treatment and Induction Boriding Method

Ulaş İpekoğlu ^a, Uğur Çavdar ^{b,1}^a İzmir Demokrasi University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 35580 İzmir, Turkey
ORCID ID: 0009-0003-3738-4722^b İzmir Demokrasi University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 35580 İzmir, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-3434-6670

Abstract

Induction boriding is a metal processing technique that applies a surface accumulation process using a high-frequency electromagnetic field on metal parts. The adoption of this method in industrial applications is anticipated due to its advantages such as high efficiency, precision, and low energy consumption. Induction boriding relies on the principle of using the electromagnetic field to heat metal parts and create desired properties on the surface. During this process, the high-frequency current produced by induction coils penetrates into the metal part, causing heating due to internal resistance. This heating allows the formation of desired characteristics like surface hardness, durability, or other specific attributes. The boriding process is carried out within the range of 2-8 hours and at temperatures between 850-1000°C. In induction boriding, faster boron diffusion is expected, leading to the anticipation of reaching the desired hardness and coating thickness values in a shorter timeframe.

Keywords: “Induction boriding, boriding, steel, heat treatment.”

1. Introduction

1.1. Borlama

Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan borlama, genel olarak bor atomlarının metal yüzeyine difüzyonu olarak tanımlanabilir. Bor atomları yüksek sıcaklıkta metal yüzeye yayınırlar ve yüzeyde esas metal atomlarıyla borür tabakalar oluştururlar. Yaygın olarak sert ve yüksek aşınma direncine sahip tabakalar elde etmek için kullanılırlar.[1] Bu işlem bor atomlarının metalik malzemenin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu ile gerçekleşir. İşlem sırasında oluşan Fe₂B bileşikler iletkenlik özelliği göstermelerinin yanı sıra sertliğin yüksek olması gibi tipik seramik özelliklerine de sahip bileşiklerdir.[2] Borlama işleminin birinci basamağında, borlayıcı ortam ve işlenecek nesnenin yüzeyindeki reaksiyon birimleri arasında reaksiyon gerçekleşir. Taneler nesnenin yüzeyinde çekirdek oluştururlar. Çekirdek oluşumu işlem süresiyle birlikte artar. Zamanla artan çekirdekler ince bir bor tabakası meydana getirir. Bor, çeliğin yüzeyine iki farklı yapıda yayılır. Borlama ısıl işlemi esnasında borür çekirdeği ilk olarak numune yüzeyinde oluşur. Oluşan ilk faz Fe₂B fazıdır. Ortamdaki bor konsantrasyonu yeterliyse FeB fazı da oluşur. [3]. Oluşan tabakalardan FeB sertlik açısından çok yüksek değerlere ulaştığından malzemeyi kırılmalık yönünden olumsuz etkilemektedir. Yani oluşan tabakanın (Fe₂B+FeB) şeklinde olması borlama işlemini başarısız kılabilir. Borlama sırasında oluşan tabakanın özellikleri; işlem sırasında kullanılan yöntem, borlama malzemesinin bileşimi, işlenecek malzemenin cinsi, işlem süresi ve sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir.

İkinci Fick Kanunu'na göre:

$$\frac{dc}{dt} = D \cdot \frac{d^2c}{dx^2} \quad (1)$$

D terimi sabit kaldıkça farklı koşullar altında aynı konsantrasyon profili elde edilebilir. Bu özellik belirli bir ısıl işlemin uygulanması için gerekli zaman üzerine sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlar. [4] Genel olarak borlama işlemi 2-8 saat aralığında yaklaşık olarak 850 – 1000 C 'de yapılmaktadır. Borlama yöntemlerini dörde ayırabiliriz. (Katı, sıvı, gaz ve plazma formda bor verici kullanılarak yapılan) [5]

¹ Corresponding Author
E-mail Address: ugur.cavdar@idu.edu.tr

1.1.1. Katı Ortamda Borlama

Bu yöntemde borlama işlemi uygulanacak malzeme, toz formdaki bor verici ortama konur ve genellikle 900-1000 c sıcaklıkta 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem, redüksiyon ortamının korunması amacıyla borlama ortamına oksijen akışının engellenebilmesi için soygaz atmosferinde; veya sıkı kapatılmış kutu içerisinde gerçekleştirilmesi şartıyla normal atmosferik ortamda yapılabilir. Tozların tanecik büyüklükleri, borlama sonucu oluşması istenen borür tabakasının özelliklerine göre 5-10 mm arasında belirlenmelidir. Borlama ortamının esas bileşeni bor karbür, amorf bor ve ferro bordur. ana borlayıcı kaynağa ek olarak NH_4Cl , BaF , $NaBF_4$, NH_4F , Na_2CO_3 , KBF_4 ve Na_2AlF_6 gibi aktivatörler kullanılır.

Borlama işleminde oluşan Fe_2B ve FeB fazlarının ısıl genleşme miktarlarındaki farklılıklar nedeniyle işlem sonucunda borlanan malzemenin yüzeyinde çatlaklar meydana gelebilir. Bu durum, borlama ısıl işleminin bazı endüstriyel uygulamalar için kabul edilemez olmasına sebep olur. Çatlamaların engellenmesinin yolu, FeB bazını azaltmak ya da tamamen yok etmektir. Bu sonuç katı ortam borlaması sayesinde mümkün kılınmıştır. H.P. Kehler tarafından yapılan borlama işleminde bor kaynağı olarak B_4C , aktivatör olarak KBF_4 , deoksiant ve dolgu maddesi olarak SiC kullanılmıştır. İşlem sonucunda yalnızca Fe_2B fazına sahip borür tabakalar ya da FeB fazı oranının oldukça az olduğu tabakalar elde edilmiştir.[6]

1.1.2. Sıvı Borlama

Borlama banyosunun sıvı halde bulunduğu yöntemdir. Sıvı borlama 700 ile 1000 derece arasında gerçekleştirilebilir. Sıvı borlama işlemleri elektrolitik olmayan / elektrolitik olarak iki ayrı şekilde sınıflandırılabilir.

Sıvı borlama yönteminin birçok dezavantajı bulunmaktadır. Bunlar;

- Borlama işlemi sonucunda işlenen parçanın yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor kalıntıları bulunur. Bu durumu düzeltmek hem zaman kaybına hem de maliyet artışına sebep olur.
- Borlama işleminin başarıyla sonuçlandırılabilmesi için borlama esnasında banyo viskozitesinin artırılması gerekmektedir. Bu amaçla sıvı banyosuna tuz eklenmektedir. Bir diğer maliyet artış sebebi de budur.
- Kullanılacak fırınlar korozyif şartlara karşı dayanıklı olmalıdır.
- Elektrolitik sıvı borlama işlemi, demir esaslı malzemelere uygulanan ve $900^{\circ}C$ - $950^{\circ}C$ sıcaklık aralığında gerçekleştirilen borlama işlemidir.
- Tuz banyosunda elektrolitik borlama işleminde, katot malzemesi borlanacak demir esaslı malzeme, anot malzemesi grafit ve elektrolit malzemesi boraktır.
- Kaplama tabakasının homojen dağılması ve tabaka kalınlığının parçanın tüm bölgelerinde aynı olması amacıyla elektroliz işlemi boyunca parça döndürülmektedir.

1.1.3. Gaz Borlama

Gaz fazındaki ortamda yapılan borlama işlemidir. Borlama işlemi, bir evaporatör aracılığıyla gaz haline getirilmiş bor kaynağı (BCl_3 gibi), Ar ve H_2 gazlarından oluşan belirli bir karışımın, paslanmaz çelikten yapılmış ve dış ortama kapalı olan bir oda içerisinde parçaya püskürtülmesiyle yapılır.

1.1.4. Plazma Borlama

Katı fazdaki bir malzeme enerji verilerek sıvı faza, sıvı fazdaki malzeme enerji verilerek gaz faza ve gaz fazındaki malzeme enerji verilerek plazma haline geçirilebilir. Bu işlemin tersi de gerçekleştirilebilir. Uygulamada plazma işlemi, ısıl enerjinin aktarılmasıyla, ışınla ya da elektriksel boşalma aracılığıyla elde edilir. Elektriksel boşalma, en sık kullanılan plazma borlama yöntemidir. Plazma borlama; iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom ya da molekül içeren karışımdan oluşur. Bu belirtilen durumlar arasındaki temel fark sahip oldukları enerjilerden kaynaklanır. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümelerinin kontrolü; işlem sıcaklığı, gazların karışım oranı, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla sağlanabilmektedir. [7]

1.2. İndüksiyonla Borlama

İndüksiyonla borlama, metal parçaların yüzeylerine yüksek frekansta elektromanyetik alan uygulayarak ısıtılmasını sağlayan bir termal işleme yöntemidir. Bu işlem, metal parçanın sadece istenilen bölgelerini ısıtarak, yalnızca bu bölgelerin özelliklerini değiştirmeyi amaçlar. İndüksiyonla borlama, özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan etkili bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu işlemden, bir indüksiyon bobini, metal parçanın belirli bir bölgesine elektromanyetik alan üretir. Metal, bu

elektromanyetik alandan etkilenecek hızla ısınır. Isınan metal, belirli bir sıcaklığa ulaştığında, belli bir süre boyunca bu sıcaklıkta tutularak termal işlem gerçekleştirilir. Borlama işlemi, metalin yüzeyindeki mikroyapıyı değiştirir ve böylece yüksek bir sertlik değeri elde beklenir. İndüksiyonla borlama, birçok avantaj sunar. İlk olarak, işlem hızlı ve hassas bir şekilde gerçekleşir. Metal parçanın sadece belirli bölgelerinin ısınması, enerji verimliliğini artırır ve istenmeyen termal etkileri minimize eder. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen yüzey sertliği, parçanın dayanıklılığını artırarak mekanik özelliklerini geliştirir. [8]

Frekans ve penetrasyon derinliği arasında tersinir bir ilişki vardır. Borlama difüzyonunda yüksek frekans kullanılırsa bor nüfuziyeti yüzeye yakın kısımda kalır, düşük frekans kullanıldığında ise bor nüfuziyeti yüzeyden derinlere doğru ilerler.

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (2)$$

δ : penetrasyon derinliği(mm)

f: frekans (Hz)

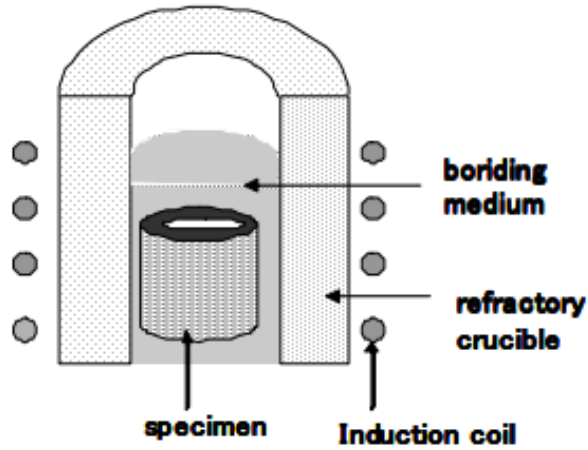
μ : manyetik geçirgenlik (H/mm)

σ : elektriksel iletkenlik (C²/N.m²) [9]

Endüstriyel üretimde kullanılmaya başlanan indüksiyonla borlama işlemi, özellikle otomotiv, havacılık ve enerji sektörlerinde parçaların dayanıklılığını ve performansını artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Bu yöntem, malzeme mühendisliği alanında önemli bir teknolojik ilerlemeyi temsil ederken, endüstriyel uygulamalarda verimliliği ve kaliteyi artırmaya yönelik sürekli araştırmalara da ilham kaynağı olmaktadır. [10]

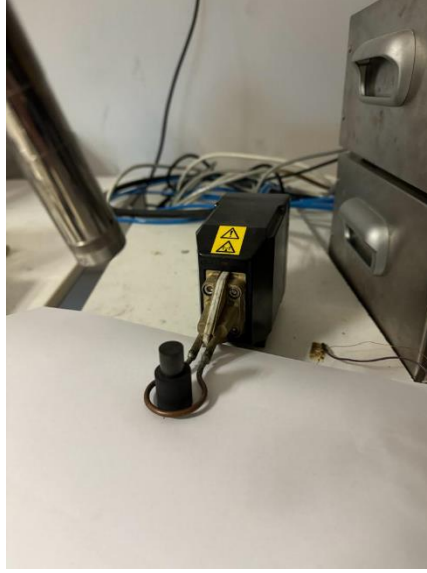
2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada borlama ısıl işlemi ve indüksiyon borlama işleminden karşılaştırılmalı bir şekilde bahsedilmiş olup indüksiyonla borlama ısıl işleminin avantajlı yönleri V. G. Shchukin ve V. V. Marusin [12] yaptıkları matematiksel model örnek gösterilerek anlatılmıştır.



Şekil 1 İndüksiyonla borlama işleminin şematik gösterimi [11]

Şekil-1 indüksiyonla borlama işleminde kullanılacak bir sistemin şematize edilmiş gösterimidir. Bu sistemde borlama, kutulara yerleştirilen parçaların yüzey tabakasının indüksiyonla ısıtılması ve bu işlemle borlama ortamının eritilmesinin mümkün kılınması yoluyla gerçekleştirilir.



Şekil 2 İndüksiyonla Borlama İşlemi

İndüksiyonla borlama işlemi Şekil-2 de görüldüğü üzere numunenin indüksiyon cihazına bağlı bobin sisteminin içerisine yerleştirildikten sonra bobin etrafında oluşan elektromanyetik alan vasıtasıyla ısıtılarak sertlik ve mukavemet özelliklerinin geliştirilmesini amaçlar.

3. Bulgular

Aşağıdaki tabloda yüzey kaplama işlemlerinin (geleneksel borlama yöntemi ve indüksiyonla borlama) zaman ve sıcaklığa göre sağladığı yüzey sertliği değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 1 : Borlama işlemi ve indüksiyonla borlama işleminin karşılaştırılması. [12]

Yüzey Kaplama İşlemi	İşlem Sıcaklığı °C	Zaman(saat)	Yüzey Sertliği(HV)
Borlama	800-1050	2-8	Max. 2000
İndüksiyonla Borlama	1100	0,194	1850-2500

Tablo 1 de görüldüğü üzere ısı işlemlerin karşılaştırmasında indüksiyonla borlamanın sertlik özelliği bakımından geleneksel borlama yöntemlerine kıyasla daha avantajlı olduğu söylenebilir.

İndüksiyonla borlama işlemi ile ilgili yapılan çalışmada V. G. Shchukin ve V. V. Marusin yaptıkları araştırmalar sonucu hareketli kaynak aracılığıyla yüksek konsantrasyonlu indüksiyonla ısıtma sırasında çeliğin yüzey katmanının difüzyon alaşımının matematiksel bir modelini geliştirmişlerdir. Matematiksel modelin yanı sıra borlu yüzey katmanına sahip bir kesici takımın ticari testini gerçekleştirerek, daha önce bilinen lazerle söndürme yöntemiyle karşılaştırmış ve geliştirilen yöntemin 2,5 kat daha verimli ve 10 kattan daha fazla maliyet verimli olduğunu belirlemişlerdir. Elektromanyetik, termal ve difüzyon süreçlerinin modeli de geliştirilmiş ve hesaplanan difüzyon borlama derinlikleri ile deneysel veriler arasında tatmin edici bir uyum elde etmişlerdir. Yaptıkları hesaplamalar sonucu buldukları teorik sonuçlar ve deneysel sonuçlar arasındaki farkın %15'i geçmediğini gözlemlemişlerdir. Böylece, yüksek konsantrasyonlu indüksiyon ile ısıtma sırasında, bor ile çeliğin alaşımı için geliştirilen birleşik matematiksel modelin doğru olduğunu söylemek mümkündür. [12]

4. Sonuç ve Tartışma

Yapılan deneysel çalışmalar ve modellemeler göz önünde bulundurulduğunda borlama ısı işleminin malzemenin sertlik ve mukavemet özelliklerini geliştirmede önemli bir katkısı olduğu görülmektedir.

Borlama prosesi indüksiyon borlama metoduyla gerçekleştirildiğinde hızlı ısınma ve soğuma süreçleri sayesinde diğer geleneksel yöntemlere göre daha hızlı bir işlem sunar. İşlemin daha kısa sürmesi dolayısıyla maliyetin azalması beklenmektedir. İndüksiyonla borlama, enerjiyi etkili bir şekilde kullanarak düşük enerji tüketimi sağlar. Endüstriyel otomasyon sistemleriyle entegre edilebilir, bu da üretim süreçlerini optimize eder. [13]

İndüksiyonla borlama prosesinde Fe2B katmanının frekansla kontrol edilebileceği düşünülmektedir. (Frekans artınca yüzeydeki tabaka sertliği artar, yüzeyde daha çok sertleştirme sağlanır.) Böylece aşınma dayanımı artmış olur.

İndüksiyonla borlama, geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılabilir. Otomotiv, havacılık, enerji, tıp ve metalurji gibi sektörlerde çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Örneğin, motor parçalarının yüzey sertleştirme işlemlerinde, dişli sistemlerde ve aşınmaya dayanıklı kaplamaların oluşturulmasında tercih edilebilir bir yöntem olması beklenmektedir. [14]

Referanslar

- [1] İ. Yıldız., A. G. Çelik. and İ. Güneş. Fe İçerisindeki Mg Elementinin Borlama İşlemine Etkisinin Araştırılması. MT Bilimsel(20), 1-10. (2021).
- [2] U.Çavdar., “Demir Esaslı Sinter Metallerine Yapılabilecek Isıl İşlemlerin Belirlenmesi Ve Geliştirilmesi.” Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa. (2005)
- [3] S. Şahin, Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa. (1999)
- [4] W. D. Callister and D. G.Rethwisch, (2017). Materials Science And Engineering: An İntroduction. John Wiley & Sons.
- [5] Topuz, P. & Aydoğmuş, T. “Investigation Of Wear Behavior Of Boronized Aisi 316 Stainless Steel” . Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 8 (2) , 1105-1114 . DOI: 10.28948/ngumuh.598201 (2019).
- [6] Z. Göy, “Borlama” Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil.Enst., İstanbul, (1984)
- [7] D. Arslan, “Kutu Borlama İşlemi Uygulanmış Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Yorulma Dayanımlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, (2017)
- [8] S. Vinodh Kumar, G. Surya Raj and M. Prince, Effects Of Pack Boriding And Induction Boriding On The Dry Sliding Wear Behavior Of High Speed Steel, Materials Today: Proceedings, Volume 59, Part 1, Pages 1105-1110, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.019>. (2022)
- [9] A. Keysan, “Balıkesir İli Şehir Merkezi ve Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesi'nin Elektromanyetik Alan Haritası”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2015)
- [10] C. Lee and L. Wang, ” Efficiency and Precision In Induction Boriding: A Comparative Study.” Manufacturing Science and Technology Journal, 28(4),512-525. (2019)
- [11] Y. Iwabuchi, and I. Kobayashi, Application of Induction Heating to Boriding. Advanced Materials Research, 586, 64–68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.586.64> (2012).
- [12] V.G. Shchukin and V.V.Marusin, Induction boriding of steels. Inorg. Mater. Appl. Res. 6, 382–387 <https://doi.org/10.1134/S2075113315040218> (2015).
- [13] Z. C. Li. and Z .Zhao, “İnduction Hardening.” Woodhead Publishing. (2009).
- [14] E. Yıldırım, H. Cebi, M. Şen and E.S. Yılmaz., “Robot Kontrollü İndüksiyon Sertleştirme Parametrelerinin Sac Metal Kalıp Yüzey Sertliğine Etkilerinin Taguchi Metoduyla İncelenmesi.”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(1), 15-23, doi:10.5505/pajes.201624540 (2017)