

Borlanmış yüksek alaşımli çeliklerde oluşan artık ısıl gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi

Yasin Kuddusi Kutucu*, Ahmet Oğur, Yaşar Kahraman

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

08.04.2013 Geliş/Received, 18.08.2013 Kabul/Accepted

ÖZ

Borlanan parçalarda oluşan kalıntı ısıl gerilmelerin kaplamalarda çatlama, ayrılma gibi olumsuz etkileri olmaktadır. Bu sebeple borlama neticesinde oluşan gerilmelerin ne boyutta olduğunun ve kaplama tabakasının kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, yüksek alaşımli çeliklerde borlama işlemi esnasında oluşan tek katmanlı borür tabakasının (Fe_2B), parça üzerinde belirli bölgelerde oluşturduğu gerilmeler ve bu gerilmelerin tabaka kalınlığına bağlı değişimi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde, oluşan gerilmelerin sıcaklık düşüşüne bağlı olarak arttığı görülmüştür. Fe_2B tabakasında basma gerilmeleri, buna karşılık çelik parçada çekme gerilmeleri olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Tabaka kalınlığının artmasıyla borür tabakasında oluşan basma gerilmelerinin azaldığı, çelik parçada oluşan çekme gerilmelerinin ve borür tabakası ile altlık malzeme arasında oluşan kayma gerilmelerinin arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: borlama, sonlu elemanlar, ısıl artık gerilme

The investigation of thermal residual stresses formed on borided high-alloy steels using finite elements method

ABSTRACT

Thermal residual stresses occurring in borided materials has some adverse effects like boride cracks and delaminations. Therefore it is important to detect level of stresses occurred after boriding and change mechanism depend on layer thickness. In this study, boride layer (Fe_2B) formation on high-alloy steels and effect of layer thickness on residual stress distribution have been investigated by using finite elements method systematically. The result of the FEM analysis revealed that, the thermal-induced residual stresses increas with decreasing temperature of the cooling process. The occurrence of compressive stresses on the boride layer and tensile stresses on the steel workpiece was deduced. It is also found that, with increasing layer thickness. the compressive stress on the boride layer decreases while tensile stress on steel workpiece and shear stress in the interlayer increases.

Keywords: boriding, finite elements method, thermal residual stress

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

Yazar e-postaları: ykutucu@sakarya.edu.tr ogur@sakarya.edu.tr kahraman@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilindiği gibi, borlama termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olup, bor atomlarının demir ve demir dışı metaller ile sermet malzeme üzerine yayındırılması temeline dayanmaktadır [1]. İşlem 700 ila 1000 0C sıcaklık aralığında 1 ila 12 saat süreyle uygulanmakta ve çelik malzeme üzerine yayılan bor atomları sert demir-bor fazı oluşturmaktadır. Borlama; katı toz, pasta, sıvı ve gaz ortamlarda yapılabilir. Bu yöntemlere ilaveten son yıllarda plazma borlama ve iyon implantasyon borlama yöntemleri de geliştirmiştir [2]. Borlama işlemi ile parça yüzeylerinde işlem şartları ve çeliğin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak 2000 – 2500 VSD sertlik değerlerine ulaşılabilir [3]. Bu işlem, yüksek alaşımlı çelikler, yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, korozyona dayanıklı çelikler, Armco demiri, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, nikel ve sinterlenmiş demir gibi farklı malzeme gruplarına uygulanabilir [3]. Malzeme yüzeyinde yüksek sertlik elde edilmesi yanında, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek korozyon direnci sağlaması ve borlama sonrası ana malzemeye ısıl işlem uygulanabilmesi borlamanın diğer yüzey sertleştirme yöntemlerinden üstün taraflarıdır. Bunun yanında plazma nitrürleme ve gaz karbürleme gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemlerine nazaran daha maliyetli olması, dönen parçalarda yüzey yorulma karakteristiklerinin zayıf olması bu işlemin dezavantajları olarak sayılabilir [1]. Literatürde yüksek alaşımlı çeliklerin yanı sıra yüksek hız çeliklerinin borlanma davranışı üzerine kapsamlı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalarda çeliğin kimyasal bileşimi ve miktarına bağlı olarak borür tabakasının morfolojisi ve kalınlığının değiştiği ifade edilmektedir [4], [5], [6].

2. SONLU ELEMANLAR MODELİ (FINITE ELEMENTS MODEL)

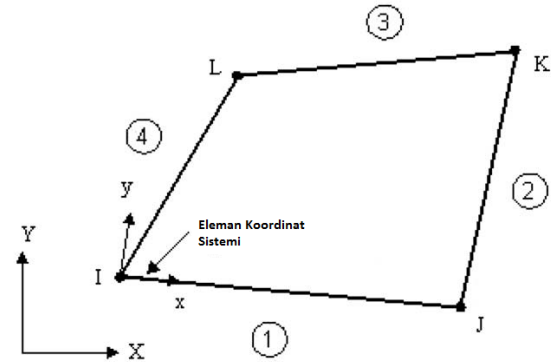
Çelik iş parçasının borlanması sonrası yüzeyinde oluşan Fe₂B borür tabakasındaki artık gerilmelerin incelenmesi amacıyla bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman analizi için Ansys 14.0 yazılımı kullanılmıştır. Hem ısıl hem gerilme analizini aynı model üzerinde yapma imkanı sağlayan 4 noktalı 4 serbestlik dereceli, yüzey gerilmeli Plane 13 Eleman tipi kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 1). Bu eleman tipi, zamana bağlı (transient) analiz yapılmasına da olanak sağlamaktadır bu sayede gerilmelerin zamanla nasıl değiştiğini inceleme imkanı doğmaktadır.

Borlama neticesinde parça yüzeyinde Fe₂B ve FeB şeklinde farklı özelliklerde iki borür tabakası oluşmaktadır. Bu tabakalardan yüzeye yakın bölgede oluşan FeB tabakası diğerine nazaran daha serttir fakat gevrek yapıda olması ve çekme türünde artık gerilmeler içermesi nedeniyle mekanik zorlanmalar altında çalışan parçalarda istenmemektedir [1], [7].

FeB tabakasının gevrekliği yanında çelik malzeme ve diğer borür tabakasından daha yüksek ısıl genişleme katsayısına sahip olması bu tabakada çatlak oluşma riskini arttırmaktadır. Bu sebeple FeB tabakasının oluşmasını engellemeye yönelik borlama sonrası vakum ve tuz banyosunda ısıl işleme tabi tutma gibi yöntemler geliştirilmiştir [8].

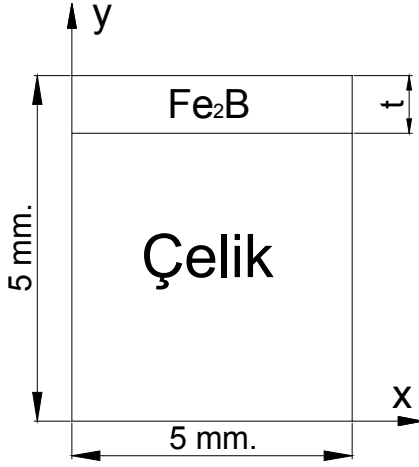
Borlama işlemine tabi tutulan çelik malzeme ile yüzeyde oluşan tek katmanlı Fe₂B bor tabakası arasında ısıl genişleme katsayısı farkından dolayı ısıl gerilmeler oluşmaktadır [9]. Bu ısıl gerilmelerin değerinin yapılan çalışmalarda 470-700 MPa aralığında basma yönünde olduğu saptanmıştır [10], [11]. Söz konusu fazın ısıl genişleme katsayısının çeliğe göre küçük olması nedeniyle soğuma sırasında çelik malzemeyle uyumlu olarak şekil değişimi gösterememekte bu durum hem kaplama tabakası hem altlık (çelik) tabakada artık gerilmelerin oluşumuna yol açmaktadır.

Literatürde bazı tabaka kalınlıkları için borlanmış parçalarda oluşan termal artık gerilmelerin deneysel yöntemlerle tespit edilen değerleri bulunmaktadır. Fakat sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bu gerilmelerin incelenmesi ve gerilme değerlerinin tabaka kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğinin saptanması üzerine çalışmaların eksikliği göze çarpmaktadır. Bu çalışmada yüzeyinde tek katmanlı Fe₂B tabakası bulunan yüksek alaşımlı çelik için tabaka kalınlığının termal artık gerilmeye olan etkisi sonlu elemanlar tekniği kullanılarak sistematik bir şekilde incelenmiştir.



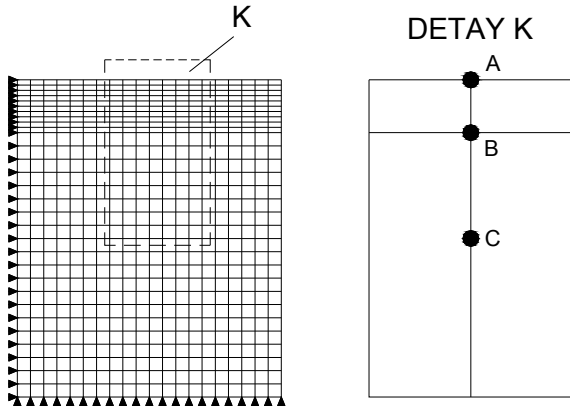
Şekil 1. Plane 13 eleman tipi (Plane 13 element type)

Analizin basitleştirilmesi için 5x5 mm² boyutlarında iki boyutlu (düzlemsel), çeyrek model hazırlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Model boyutları (Model dimensions)

Bu boyutlar deneysel borlama çalışmalarında kullanılan numune ebatlarına (10x10) karşılık gelmektedir [12], [13]. En doğru sonucu alabilmek için tüm model düzgün dörtgen (quadrilateral) elemanlara bölünmüştür (mapped mesh). Borür tabakasının hassas bir şekilde incelenmesi amacıyla bu tabaka daha sık ağ yapısı ile örülmüştür (Şekil 3). Borlama üzerine yapılan deneysel çalışmalar incelenmiş, yüzeyde oluşan borür tabaka kalınlıkları (t) 20, 40, 60, 80 ve 100 µm için analizler yapılmasına karar verilmiştir. Belirli bölgelerdeki değişimi izlemek amacıyla, sonlu elemanlar modelinde, borür tabakası üst yüzeyinde A noktası, borür tabakası ile çelik arayüzünde B noktası ve çelik malzeme iç kısımlarına uzanan bölgede yüzeyden 1 mm. içeride C noktası tanımlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Sonlu elemanlar modeli şematik gösterimi (Schematic view of finite element model)

2.1. Matematiksel model ve kabuller (Mathematic model and assumptions)

Kaplamalarda oluşan ısı gerilmeleri kaplama malzemesi ve altlık malzemenin ısı genleşme katsayılarının farklı

olmasından dolayı oluşmakta ve iki boyutlu model için şu formül ile ifade edilmektedir [14]:

$$\sigma = E_k \Delta \alpha \Delta T \frac{1+\nu}{1-\nu^2} \quad (1)$$

Formülde σ , E_k , $\Delta \alpha$, ΔT ve ν sırasıyla ısı gerilme, kaplama malzemesinin elastiklik modülü, iki malzeme arasındaki ısı genleşme katsayısı farkı, soğuma boyunca olan sıcaklık düşüşü ve kaplama malzemesinin poisson oranını temsil etmektedir.

Borlama işlemlerinde çelik ile borür tabakası arasında testere dişi görünümüne sahip bir profil oluşur. Modeli basitleştirmek amacıyla iki tabaka arayüzünün düz bir doğru şeklinde olduğu varsayılmıştır. Çelik ve Fe₂B borür tabakasının mekanik ve ısı özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Literatürde yeterli bilgi olmaması nedeniyle borür tabakasının özelliklerinin zamanla değişmediği kabul edilmiştir. Hem borür tabakası hem çelik malzemenin elastik bölgede kalacağı kabul edilerek tüm modeller için elastik analiz yapılmıştır.

Tablo 1. Fe₂B Mekanik ve ısı özellikleri [7], [15] (Mechanical and thermal properties of Fe₂B)

Özellik	Değer
Elastisite Modülü (Gpa)	285
Isı iletim katsayısı (W/mK)	17,4
Poisson Oranı	0,28
Yoğunluk (Kg/m ³)	7430
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ m/mK)	9,2
Isı Kapasitesi (J/kgK)	650

Tablo 2. Yüksek alaşımlı DIN/ISO 1,2344 çeliğin mekanik ve ısı özellikleri [16], [17] (mechanical and thermal properties of high alloy steel DIN/ISO 1,2344)

Özellik	Sıcaklık (K)			
	293	423	593	753
Elastisite Modülü (Gpa)	210	205	195	170
Özellik	Sıcaklık (K)			
	293	623	973	
Isı iletim katsayısı (W/mK)	27	30	33	
Poisson Oranı	0,3			
Yoğunluk (Kg/m ³)	780			
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ m/mK)	13,3			
Isı Kapasitesi (J/kg.K)	4600			

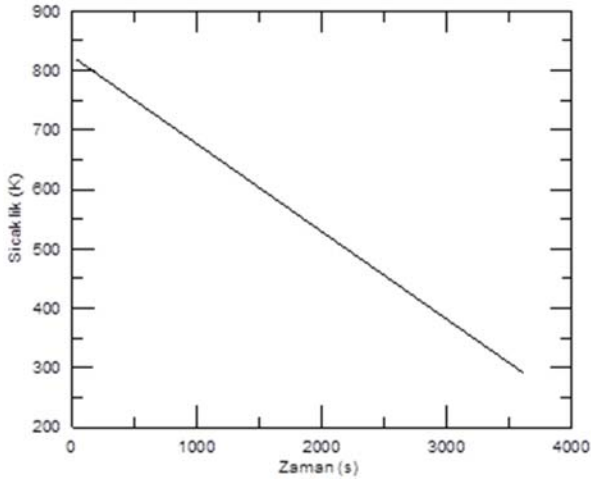
2.2. Sonlu elemanlar formülasyonu ve sınır şartları (Finite elements formulation and boundary conditions)

Kalıntı ısı gerilmelerin hesaplanmasında kullanılan, temeli virtüel işler prensibine dayanan sonlu elemanlar formülasyonu şu şekildedir [18]:

$$\{\sigma\} = [C][B]\{\varepsilon\} - [C]\alpha_m\{\Delta T\} \quad (2)$$

Bu denklemde $\{\sigma\}$ gerilme vektörünü, $[C]$ elastiklik matrisini $[B]$ gerilme-uzama interpolasyon matrisini, $\{\varepsilon\}$ gerilme vektörünü, α_m ısıl genleşme katsayısını ve ΔT soğuma boyunca olan sıcaklık düşüşünü göstermektedir.

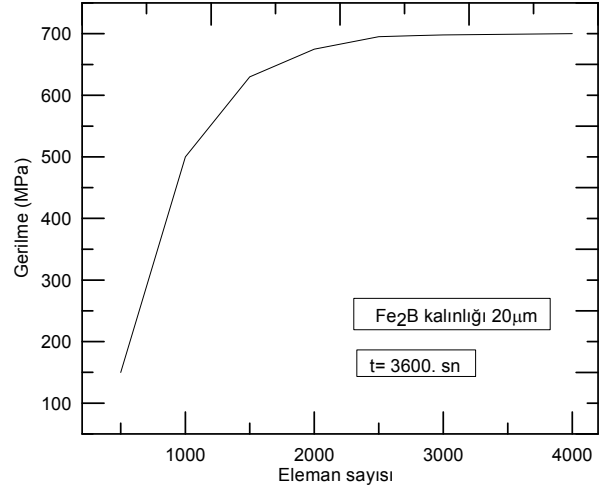
Modelin sol ve alt kenar çizgilerine simetri sınır koşulu tanımlanmıştır. Model üst yüzeyine uygulanan sıcaklığın zamanla değişimini gösteren grafik Şekil 4'te görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi sıcaklık 3600 saniye içerisinde 823 K'den, oda sıcaklığı olan 293 K'e düşmektedir.



Şekil 4. Sonlu elemanlar modelinde parça üst yüzeyine uygulanan sıcaklık-zaman grafiği (Time-temperature diagram exposed to model upper surface)

Analizlerde kullanılacak eleman sayısının uygunluğunu belirlemek adına ağ yapısı iyileştirme (mesh convergence) çalışmaları yapılmıştır. Ansys modelinde eleman sayısı artırılarak 20 mm tabaka kalınlığına sahip modelde A noktasındaki von-mises gerilmesinin değişimi izlenmiştir (şekil 5). Sonuç olarak bu tabaka kalınlığı için uygun eleman sayısı 3000; buna bağlı olarak nokta sayısı 3111 olarak karar verilmiştir. Diğer tabaka kalınlıklarındaki modeller de 20 μm ile orantılı olacak şekilde; 40 μm için 3621 nokta, 3500 eleman; 60 μm için 4131 nokta, 4000 eleman; 80 μm için 4641 nokta, 4500 eleman; 100 μm için 5241 nokta, 5000 elemana ayrılmıştır.

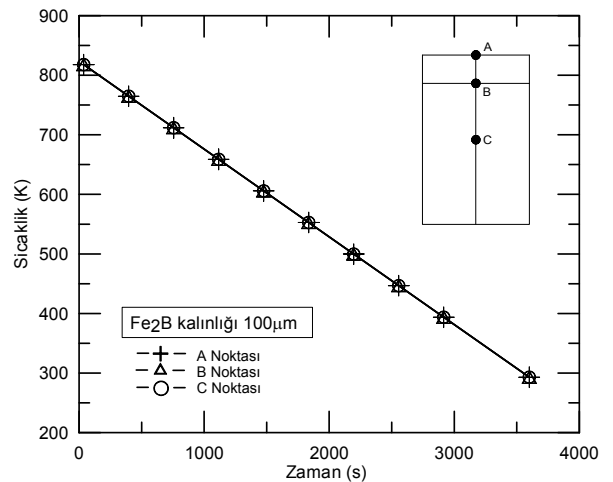
Borlanmış yüksek alaşımli çeliklerde oluşan artık ısıl gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi



Şekil 5. A noktasındaki von mises gerilmesinin eleman sayısına bağlı değişimi (Change of von-mises stress in the point A depend on total element number)

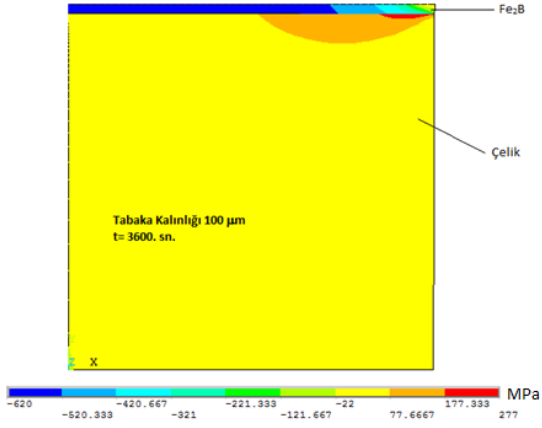
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

100 μm tabaka kalınlığındaki parçanın, A, B ve C noktalarındaki sıcaklığın zamanla değişimi gösteren grafik Şekil 6'da görülmektedir. Parça boyutlarının küçük olması parça içerisinde sıcaklık farkının önemsiz mertebede kalmasına yol açmıştır. Parça dış yüzeyi ile iç kısımları arasındaki sıcaklık farkının 0,65 K civarında olduğu görülmüştür. Diğer tabaka kalınlıklarında ise beklendiği gibi sıcaklık farkları yok denecek kadar azdır. Dolayısıyla oluşan gerilmelerin tamamen bor tabakası ile çelik malzemenin ısıl genleşme katsayılarının farklılığından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu durum benzer çalışmalardaki sonuçlara da uymaktadır [18], [19].



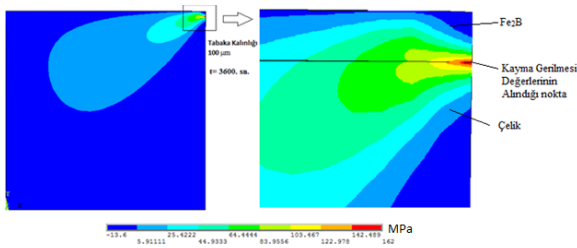
Şekil 6. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (Tabaka kalınlığı 100 μm) (Temperature change depend on time on A, B and C points for 100 μm layer thickness)

Şekil 7’de 100 µm tabaka kalınlığı ve t=3600 s için x yönünde gerilme dağılımı verilmiştir. Gerilmelerin borür tabakasında basma, çelik malzemede çekme şeklinde olduğu görülmektedir. Simetri eksenini olmayan uç serbest şekil değiştirebildiği için gerilmenin işareti doğal olarak değişmiştir. Çelik malzemenin ısı genleşme katsayısının borür tabakasından yüksek olması nedeniyle, soğuma esnasında daha fazla büzülme bu sonucunda çelik malzeme, borür tabakasına basma gerilmeleri uygulamaktadır.



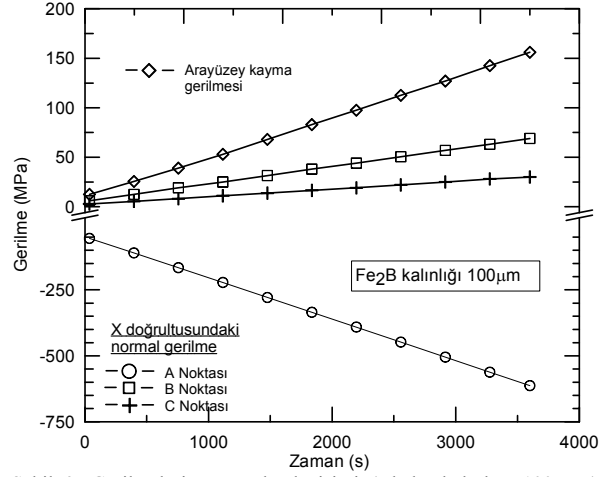
Şekil 7. x Yönündeki gerilme dağılımı (Tabaka Kalınlığı 100 µm, t=3600. sn.) (Stress distribution in x direction)

Şekil 8 ise xy düzlemindeki kayma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Şekil 8 incelendiğinde gerilmenin, simetri eksenini olmayan serbest uçtaki ara yüzeyde en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Böylelikle zamana ve tabaka kalınlığına bağlı kayma gerilmesi değerlerinin bu noktadan alınması uygundur.



Şekil 8. xy düzlemi kayma gerilmesi dağılımı (Tabaka Kalınlığı 100 µm, t=3600. sn.) (Shear stress distribution on xy plane)

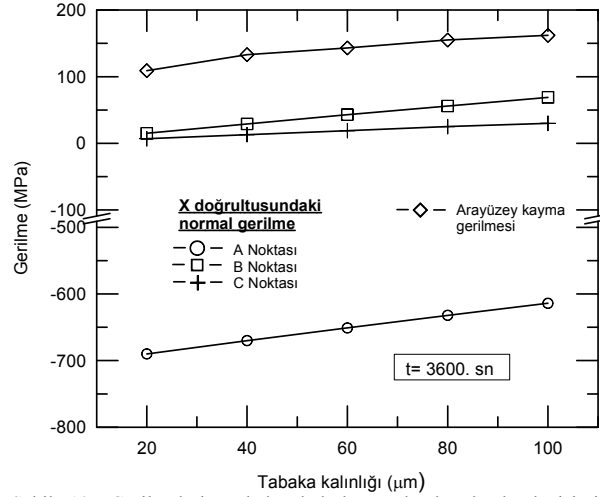
Şekil 9’da görüldüğü gibi, A noktasında basma yönünde olmak üzere tüm gerilmelerin değeri soğumaya bağlı olarak zamanla artmaktadır. Bunun sebebi; borür tabakası ile çelik malzemenin ısı genleşme katsayılarının farklı olması sonucu, parça soğudukça büzülme miktarları arasındaki farkın artmasıdır.



Şekil 9. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 100 µm) (Stress change depend on time)

Görüldüğü gibi en yüksek gerilmeler 3600. saniyede oluşmaktadır. Bu sebeple tabaka kalınlığına bağlı gerilme analizi için 3600. saniyedeki gerilme değerlerinin alınması uygun olacaktır.

Analiz sonuçlarından, A,B,C noktalarında x yönündeki gerilmeler ve Şekil 8’de gösterilen nokta için kayma gerilmesinin en yüksek değerleri (t=3600. sn.) alınmış ve tabaka kalınlığına bağlı değişimi grafiğe dökülmüştür (şekil 10).



Şekil 10. Gerilmelerin tabaka kalınlığına bağlı olarak değişimi (t=3600 sn.) (Stress change depend on layer thickness)

Şekil 10’daki grafikte görüldüğü gibi borür tabakası üzerindeki A noktası için hesaplanan artık gerilmenin büyüklüğü artan tabaka kalınlığıyla azalmaktadır. Tabaka kalınlığının 20 mikrondan, 100 mikrona değişmesi durumunda, basma gerilmesinin büyüklüğü 690 MPa değerinden 614 MPa düşmektedir. Literatürde, yüzeyinde tek katmanlı borür tabakası içeren çelikler

üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan borür tabakasındaki basma gerilmesinin 471 ile 700 MPa değerleri arasında değiştiği görülmüştür [10], [11]. Bu çalışmada 100 mikron kalınlığındaki borür tabakası için basma yönünde 614 MPa olarak bulunan gerilme değeri, aynı kalınlıktaki borür tabakası için literatürde deneysel çalışmalarla basma yönünde 600 MPa olarak tespit edilen gerilme değerine oldukça yakındır [20]. Borür tabakasında basma gerilmelerinin oluşması beklenen bir durum olup, ısı genleşme katsayısı yüksek olan çelik malzemenin soğuma esnasında x yönünde borür tabakasına göre daha fazla büzölmeye çalışması ve bunun sonucu olarak üstteki tabakayı sıkıştırması ile açıklanabilir [21]. Borür tabakası ile çelik ara yüzeyindeki B noktasında ise, gerilmenin çekme türünde olduğu ve büyüklüğünün tabaka kalınlığıyla artarak 15 MPa'dan 69 MPa'a ulaştığı görülmektedir (Şekil 10). C noktası da B noktasına benzer şekilde ancak büyüklüğü nispeten daha düşük olan gerilmelerin etkisi altındadır. Arayüzey kayma gerilmesi ise tabaka kalınlığı arttıkça 109 MPa'dan 162 MPa değerine yükselmektedir.

4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yüksek alaşımlı çeliğin borlanması sonucu oluşan tek fazlı borür tabakasına ait yukarıda incelenen sonlu eleman analizlerinden başlıca şu sonuçlar çıkarılabilir:

- 1- Yapılan analizler neticesinde borür tabakasında basma, çelik malzemede çekme artık gerilmeleri oluştuğu saptanmıştır.
- 2- Tabaka kalınlığının artmasıyla borür tabakasında basma gerilmelerinin azaldığı ve arayüzeyde kayma gerilmelerinin arttığı görülmüştür. Kayma gerilmesinin artması tabaka ayrılması riskini doğurabilmektedir. Bu nedenle, bu tür yüzey işleminde tek fazlı borür tabakası oluşturulmuş olmasına rağmen, kalınlığın aşırı değerler almaması önerilir.
- 3- Modelleme ve sınır şartlarının doğru tanımlanması durumunda, borlanmış parçalarda soğuma esnasında oluşan ısı gerilmelerin simüle edilebileceği anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Sinha, «Boriding (Boronizing),» %1 içinde *J. Heat Treating, American Society for Metals, Metals Park, OH*, 1991.
- [2] S. Ünlü ve S. Yılmaz, «Bor ve borlamanın kullanım alanları», *Mühendis ve makina*, cilt 47, no. 552, 2005.
- [3] F. Karakullukçu, K. Genel ve M. İpek, «Dekarbürizasyonun AISI H13 çeliğinin borlanma

davranışına etkisi,» *Sakarya Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1992.

- [4] K. Genel, «Boriding kinetics of H13 steel,» *Vacuum*, cilt 80, no. 451-457, 2005.
- [5] S. Taktak, «Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels,» *Materials & Design*, cilt 28, pp. 1836-184, 2007.
- [6] V. Sista, O. Kahvecioğlu, L. Eryılmaz ve A. Erdemir, «Electrochemical boriding and characterization of AISI D2 tool steel,» *Thin Solid Films*, cilt 520, pp. 1582-1588, 2001.
- [7] M. Kulka ve A. Pertek, «Gradient formation of boride layers by borocarburing,» *Applied surface science*, cilt 254, pp. 5281-5290, 2008.
- [8] İ. Özbek, *Borlama yöntemiyle AISI M50, AISI M2 yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performansının geliştirilmesi*, Sakarya: Sakarya Üniversitesi, 1992.
- [9] T. Ericsson, «Residual stresses caused by thermal and thermochemical surface treatments,» *Advances in Surface Treatments*, cilt 4, pp. 110-112, 1985.
- [10] I. Campos-Silva, E. Hernández-Sánchez, G. Rodríguez-Castro, A. Rodríguez-Pulido, C. López-García ve M. Ortiz-Domínguez, «Indentation size effect on the Fe₂B/substrate interface,» *Surface and Coatings Technology*, cilt 206, pp. 1816-1823, 2011.
- [11] L. Zhenzhan, W. Ziming ve S. Xichen, «The influence of internal stress and preferred orientation on the abrasive wear resistance of a boronized medium carbon steel,» *Wear*, cilt 138, pp. 285-294, 1990.
- [12] K. Genel, L. Özbek ve C. Bindal, «Kinetics of boriding of AISI W1 steel,» *Materials Science and Engineering*, cilt 347, pp. 311-314, 2003.
- [13] İ. Özbek ve C. Bindal, «Kinetics of borided AISI M2 high speed steel,» *Vacuum*, cilt 86, pp. 391-397, 2011.
- [14] Y. Wang, W. Tian, Y. Yang, G. C. Li ve L. Wang, «Investigation of stress field and failure mode of plasma sprayed Al₂O₃-13%TiO₂ coatings under thermal shock,» *Materials Science and Engineering*, cilt 516, pp. 103-110, 2009.
- [15] B. Xiao ve J. Feng, «The elasticity, bondhardness and thermodynamic properties of X2B (X=Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo, W) investigated by DF theory,» *Physica B*, cilt 405, pp. 1274-1278, 2010.
- [16] «Material Properties Data available on website,» [Çevrimiçi]. Available: <http://www.matweb.com>. [Erişildi: 20 Mayıs 2013].
- [17] «Material Properties Data available on website,» [Çevrimiçi]. Available: <http://www.schmolz->

- bickenbach.de. [Erişildi: 20 Mayıs 2013].
- [18] F. Şen, O. Sayman, E. Çelik ve M. Toparlı, «Stress analysis of high temperature ZrO₂ insulation coatings on Ag using finite element method,» *Journal of Materials Processing Technology*, cilt 80, pp. 239-243, 2006.
- [19] F. Sen, E. Çelik ve M. Toparlı, «Transient thermal stress analysis of CeO₂ thin films on Ni substrates using finite element methods for YBCO coated conductor,» *Materials and Design*, cilt 28, pp. 708-712, 2007.
- [20] R. Prümmer ve W. Pfeiffer, «Residual stresses in borided layers,» *Journal of the Less Common Metals*, cilt 117, pp. 411-414, 1986.
- [21] A. Waheed ve F. Soliman, «Effect of Differential Thermal Expansion on Stress Generated in Coating,» *Journal of Material Science Technology*, 1999.