

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN BORLANMASI
SONUCUNDA OLUŞAN ISIL ARTIK
GERİLMELERİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin Kuddusi KUTUCU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet OĞUR

Temmuz 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN BORLANMASI
SONUCUNDA OLUŞAN ISIL ARTIK
GERİLMELERİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin Kuddusi KUTUCU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 13 / 06 /2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Ahmet OĞUR
Jüri Başkanı



Prof. Dr. Kenan GENEL
Üye



Prof. Dr. Cuma BİNDAL
Üye

ÖNSÖZ

Günümüzde kullanımı gittikçe yaygınlaşan, üstün özelliklere sahip bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışma daha önce üzerinde fazlaca durulmayan borlamada oluşan kalıntı gerilmelerin sonlu elemanlar metodu ile modellenmesini konu edinmekte ve literatürde bu konudaki boşluğu doldurup bundan sonra yapılacak çalışmalara önemli bir kaynak olacağı ümit edilmektedir.

Bu çalışmanın yapılmasında benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ahmet OĞUR'a, yol gösterici önerileriyle ufkumu açan ve desteğini hep arkamda hissettiğim Prof. Dr. Kenan GENEL Hocam'a, çalışmalarım boyunca bana yürekten cesaret veren ve teknolojik imkanlarını benden esirgemeyen Yard. Doç. Dr. Yaşar KAHRAMAN'a, sonlu elemanlar yazılımlarındaki bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren Yard. Doç. Dr. Erman Aslan'a ve son olarak tez çalışmam boyunca oda arkadaşlarım olmaları sebebiyle aynı ortamı paylaştığımız ve sabır ve anlayışla bana desteklerini esirgemeyen mesai arkadaşlarım Arş. Gör. M. İskender ÖZSOY ve Arş. Gör. N. Gökhan ADAR 'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bugünlere gelmemde hiç şüphesiz en büyük pay sahibi olan, beni her zaman can-ı gönülden destekleyen başta anne ve babam olmak üzere tüm aileme en içten şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
BORLAMA.....	3
2.1. Borlama İşleminin Tarihsel Gelişimi	3
2.2. Borlama İşlemi.....	4
2.3. Borlama İşleminin Avantajları	7
2.4. Borlama İşleminin Dezavantajları	8
2.5. Borlama İşlemleri	9
2.5.1. Kutu borlama işlemleri	9
2.5.1.1. Çok bileşenli borlama	12
2.5.1.2. Akışkan yatakta borlama	13
2.5.1.3. Pasta borlama	15
2.5.2. Sıvı borlama.....	16
2.5.3. Gaz borlama.....	17
2.5.4. Plazma borlama	18
2.6. Borlanabilen Malzemeler ve Bor türlerin Genel Özellikleri.....	19
2.6.1. Fe-B denge diyagramı	23

2.6.2. Borür tabakasının yapısı, bileşimi ve kalınlığı	24
2.7. Bor Tabakasının Özelliklerine Etki Eden Faktörler	27
2.7.1. Borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonun etkisi	27
2.7.2. İşlem sıcaklığı ve zamanının etkisi	28
2.7.3. Alaşım elementlerinin etkisi	30
2.8. Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulamaları	35
BÖLÜM 3.	
BORLANMIŞ YÜKSEK ALAŞIMLI ÇELİĞİN MODELLENMESİ.....	39
3.1. Sonlu Elemanlar Metodu	39
3.2. Borlanmış Yüksek Alaşimli Çeliğin Modellenmesi	42
3.2.1. Modelleme	43
3.2.1.1. Tabaka kalınlığı	45
3.2.2. Malzeme özelliklerinin girilmesi	45
3.2.3. Eleman tipi ve ağ yapısı (mesh)	46
3.2.4. Sınır şartları ve yüklerin girilmesi	48
BÖLÜM 4.	
SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI	51
4.1. Tabaka Kalınlığı 20 µm İçin Analiz Sonuçları	51
4.2. Tabaka Kalınlığı 40 µm İçin Analiz Sonuçları	54
4.3. Tabaka Kalınlığı 60 µm için Analiz Sonuçları.....	57
4.4. Tabaka Kalınlığı 80 µm için analiz sonuçları	60
4.5. Tabaka Kalınlığı 100 µm için analiz sonuçları	62
4.6. Testere Dişi Profilineki Borür Tabakasındaki Gerilmelerin İncelenmesi	65
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
5.1. Sonuçlar	69
5.2. Öneriler	70
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	76

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HV	: Vickers sertliği
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
ASTM	: Amerikan standart
[K]	: Direngenlik matrisi
(P)	: Kuvvet vektörü
{ δ }	: Yer değiştirme
K	: Kelvin sıcaklık birimi
FEM	: Finite elements method (Sonlu elemanlar metodu)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çeliklere uygulanan sertleştirme işlemlerinin mukayesesi	6
Şekil 2.2. Katı borlama işleminin şematik gösterimi	11
Şekil 2.3. Akışkan yatakta borlama işleminin şematik gösterimi	14
Şekil 2.4. Fe-B denge diyagramı	23
Şekil 2.5. Borür tabakalarının şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.6. Borür tabakalarının türleri, a) FeB, b) Fe ₂ B, c) Geçiş zonu	25
Şekil 2.7. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması.	27
Şekil 2.8. C45 çeliğine uygulanan borlama işleminde sıcaklık ve zamanın etkisi. ...	29
Şekil 2.9. % 0.2 C'lu yumuşak çeliğin 30 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda plazma borlama yöntemiyle borlanması ile oluşan bor tabakası kalınlıklarının karşılaştırılması.....	29
Şekil 2.10 Bazı çeliklerde, borür tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi. .	30
Şekil 2.11. Karbon miktarına bağlı olarak borür tabakasındaki FeB ve Fe ₂ B fazlarının sertliğinin değişimi.	32
Şekil 2.12. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi	35
Şekil 3.1. Sonlu elemanlar yönteminde düğümler.	40
Şekil 3.2. FeB ve Fe ₂ B tabakaları arasında oluşan çatlak.	43
Şekil 3.3. Sonlu elemanlar modelinin boyutları.	44
Şekil 3.4. Plane 13 eleman tipi.....	47
Şekil 3.5. Model ağ yapısı.....	48
Şekil 3.6. Sonlu elemanlar modeli.	49
Şekil 3.7. Model üst yüzeyine uygulanan sıcaklık zaman prosesi.	49
Şekil 4.1. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (Tabaka Kalınlığı 20 µm).	51
Şekil 4.2. x yönündeki gerilme dağılımı σ_x (tabaka kalınlığı 20 µm, t=3600. sn.). ...	52
Şekil 4.3. Kayma gerilmesi dağılımı xy düzlemi (tabaka kalınlığı 20 µm, t=3600. sn.).	53

Şekil 4.4. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 20 μm).	53
Şekil 4.5. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 40 μm).	54
Şekil 4.6. x yönündeki gerilme dağılımı (tabaka kalınlığı 40 μm , t=3600. sn.).	55
Şekil 4.7. Kayma gerilmesi dağılımı xy düzlemi (tabaka kalınlığı 40 μm , t=3600. sn.).	56
Şekil 4.8 Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 40 μm).	56
Şekil 4.9. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (Tabaka Kalınlığı 60 μm).	57
Şekil 4.10. x yönündeki gerilme dağılımı (tabaka kalınlığı 60 μm , t=3600. sn.).	58
Şekil 4.11. xy Düzlemi Kayma Gerilmesi Dağılımı (Tabaka Kalınlığı 60 μm , t=3600. sn.)	59
Şekil 4.12. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 60 μm)	59
Şekil 4.13. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 80 μm)	60
Şekil 4.14. x yönündeki gerilme dağılımı (tabaka kalınlığı 80 μm , t=3600. sn.).	61
Şekil 4.15. xy Düzlemi Kayma Gerilmesi Dağılımı (Tabaka Kalınlığı 80 μm , t=3600. sn.).	61
Şekil 4.16. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 80 μm).	62
Şekil 4.17. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (Tabaka Kalınlığı 100 μm)	63
Şekil 4.18. x yönündeki gerilme dağılımı (Tabaka Kalınlığı 100 μm , t=3600. sn.). .	63
Şekil 4.19. xy düzlemi kayma gerilmesi dağılımı (tabaka kalınlığı 100 μm , t=3600. sn.)	64
Şekil 4.20. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 100 μm)	65
Şekil 4.21. Testere dişi profiline sahip model.....	66
Şekil 4.22. Modelin free mesh seçeneği ile oluşturulmuş ağ yapısı	66
Şekil 4.23. x yönünde gerilme dağılımı (tabaka kalınlığı 100 μm , t=3600. sn.).....	67
Şekil 4.24. Tabaka kalınlığına bağlı olarak gerilmelerin değişimi	68

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri	6
Tablo 2.2. Katı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri.	11
Tablo 2.3. Ekabor tozlarının özellikleri	12
Tablo 2.4. Toz ortamında borlanan bazı malzemeler için borlama sıcaklıkları ve elde edilebilecek optimum tabaka kalınlıkları.	20
Tablo 2.5. Çeşitli altlık malzemelerin borlanması sırasında oluşan borürlerin ergime sıcaklıkları ve mikro sertlik değerleri	22
Tablo 2.6. FeB ve Fe ₂ B fazlarının tipik özellikleri	26
Tablo 2.7. %0.2 C'lu yumuşak çeliğin 30 dakika süreyle değişik sıcaklıklarda plazma borlama yöntemiyle borlanması ile oluşan bor tabaka kalınlığının zamanla değişimi.	30
Tablo 2.8. Borlama işlemine tabii tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları	36
Tablo 3.1. Yüksek alaşımlı DIN/ISO 1,2344 çeliğinin mekanik ve ısıl özellikleri	46
Tablo 3.2. Fe ₂ B mekanik ve ısıl özellikleri	46

ÖZET

Anahtar kelimeler: Borlama, Sonlu Elemanlar, Isıl Artık Gerilme

Bu çalışmada, yüksek alaşımlı çeliklerde borlama işlemi esnasında oluşan tek katmanlı borür tabakasının (Fe_2B), parça üzerinde oluşturduğu artık ısıl gerilmeler ve bu gerilmelerin tabaka kalınlığına bağlı değişimi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Borlanmış parçanın 2 boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Modelin 823 K'den oda sıcaklığına (293 K) soğutulması Ansys yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında zamana bağlı (transient) ısıl analiz ve gerilme analizi yapılmıştır.

Yapılan analizler neticesinde, oluşan gerilmelerin sıcaklık düşüşüne bağlı olarak arttığı görülmüştür. Fe_2B tabakasında basma gerilmeleri, buna karşılık çelik parçada çekme gerilmeleri oluştuğu 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.

INVESTIGATION OF THERMAL RESIDUAL STRESSES ON HIGH-ALLOY STEELS AFTER BORIDING

SUMMARY

Key Words: Boriding, Finite Elements Method, Thermal Residual Stress

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. A 2-D Finite Elements model was created and a transient thermal and stress analysis was performed on the model by simulating cooling process, from 823 K to room temperature(293 K) by using ANSYS code.

The result of the FEM analysis revealed that, the thermal-induced residual stresses increases 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.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mühendisliğin temel dallarından biri olan Makine Mühendisliğinde malzeme özelliklerinin geliştirilmesi gelişen teknolojiye paralel olarak beklenen bir gerçektir. Bu malzemelerden belirli bir dayanıma sahip olması ve uygulanan yükleri taşıması beklenmektedir. Malzemelerin verimli olarak kullanılabilmesi için elektrik, optik, termal özellikler ile kullanım süreleriyle yakından ilgili olan korozyon ve aşınma dayanımı gibi gerekli bazı yüzey özelliklerini de taşıması gerekmektedir.

Ekonomik kaybın büyük bir kısmı makine ve gereçlerin çevresel etkilere maruz kalan mekanik parçalarında oluşan korozyon ve aşınmadan dolayı ortaya çıkmaktadır. Genelde bu özellikleri (mekanik + yüzey) tek bir malzemede bulmak ya olanaksız ya da çok pahalı olmaktadır. Bu nedenle mühendislik malzemelerinin, gerekli yapısal özellikleri sağlayan nispeten ucuz bir malzemedan seçilmesi ve diğer yüzey özelliklerinin ise yüzey modifikasyonları ile sağlanması en uygun çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bilindiği gibi, borlama termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olup, bor atomlarının demir ve demir dışı metaller ile sermet malzeme üzerine yayındırılması temeline dayanmaktadır [1]. Çelik malzeme üzerine yayınan bor atomları sert demir-bor fazı oluşturmaktadır. Borlama işlemi ile parça yüzeylerinde işlem şartları ve çeliğin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak 2000 – 2500 VSD sertlik değerlerine ulaşılabilir [3]. İşlem, 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 uygulanabilmektedir [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 nitrüleme 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.

Borlama neticesinde parça yüzeyinde Fe_2B 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 [1,4].

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 [5].

Borlama işlemine tabi tutulan çelik malzeme ile yüzeyde oluşan tek katmanlı Fe_2B bor tabakası arasında ısıl genişleme katsayısı farkından dolayı ısıl gerilmeler oluşmaktadır [11]. Bu ısıl gerilmelerin değerinin yapılan çalışmalarda 470-700 MPa aralığında basma yönünde olduğu saptanmıştır [9,10]. Söz konusu fazın ısıl genişleme katsayısının çeliğe göre küçük olması nedeniyle soğuma sırasında çelik malzemeye uyumlu olarak şekil değişimi gösterememekte bu durum hem faz tabakası hem altlık (çelik) tabakada artık gerilmelerin oluşumuna yol açmaktadır.

Literatürde termal artık gerilmelerin ölçümü üzerine yapılan çalışmaların belirli tabaka kalınlıkları için ölçüldüğü ancak tabaka kalınlığına bağlı olarak değişimin detaylı olarak incelenmediği göze çarpmaktadır. Bu çalışmada yüzeyinde tek katmanlı Fe_2B tabakası bulunan yüksek alaşımlı çelik için tabaka kalınlığının termal artık gerilmeye olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2. BORLAMA

Bu bölümde borlama işlemi hakkında genel bilgi verilecektir. Borlama işleminin özellikleri, kullanım amaçları, avantaj ve dezavantajları üzerinde durulacaktır.

2.1. Borlama İşleminin Tarihsel Gelişimi

Bor elementinin atom ağırlığı 10,82 atom numarası 5 olup periyodik sistemde 3A grubunda yer almaktadır. Yoğunluğu 2300 kg/m^3 , atom yarıçapı 1.78 \AA erime noktası $2092 \text{ }^\circ\text{C}$ kaynama noktası $2550 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Bu element genellikle kristal yapı olarak tetragonal ve hegzagonal yapıda ve amorf yapıda olabilmektedir. Sertliği yaklaşık 5000HV dir. Metalle ametal arası özelliklere sahip, metalik bir iletken çok yarı iletkenidir. Bor elementi doğada tek başına bulunmamakta, oksijenle bağ kurmaya yatkın olduğundan pek çok değişik oksijen bileşimi oluşturmaktadır. Borun oksijen ile yaptığı bileşiklere borat denmektedir [1]. Oda sıcaklığında zayıf bir iletken olmasına rağmen sıcaklığının artırılmasıyla iletkenliği oldukça artmaktadır.. Bu özellik metallerde tam aksinedir. Havada ısıtılan bor, yeşil alevle yanarak bor oksit (B_2O_3) meydana getirir [2]. Bor periyodik cetveldeki III-A grubunun karbon ve silisyum elementlerine benzerliği oldukça fazla ve oksijene karşı affinitesi yüksek olan bir elementtir. Bu element; doğada sırasıyla %19.10-20.31 ve %79.69-80.90 oranında, B10 ve B11 ile gösterilen 2 çeşit dengeli izotopa sahiptir. Bor izotoplarının doğadaki oranları bölgelere göre farklılıklar göstermekle birlikte bilinen yataklarındaki B10 miktarı; A.B.D.-Kaliforniya'da düşük, Türkiye'de ise yüksektir [4].

İlk olarak 1808 yılında Fransız Kimyacı Gay Lussac ve İngiliz Kimyacı Sir Humphry Davy elementel boru aynı zamanda elde edilmiştir. Sözü edilen bilim adamları saflığı %50'yi geçmeyen koyu renkli ve yanıcı özellik gösteren bor elementini elde etmeyi başarmışlardır. Yaklaşık %86 saflıkta ve yüksek miktarda elementel bor eldesi 1895

yılında Henry Moissan tarafından borik asit ve magnezyum'u indirgeme işlemine tabi tutmak suretiyle başarılmıştır. Moissan Prosesi günümüzde de ticari olarak düşük saflıkta amorf bor elementi elde edilmesinde kullanılmaktadır. Son olarak 1909 yılında, Weintraub BCl_3 ' ü bir elektrik ark ocağında dekompoze ederek %99 saflıkta bor elementi elde etmiştir. Bu tarihten sonra da yüksek saflıkta bor elementi eldesi için yeni yöntemler geliştirilmiştir [5].

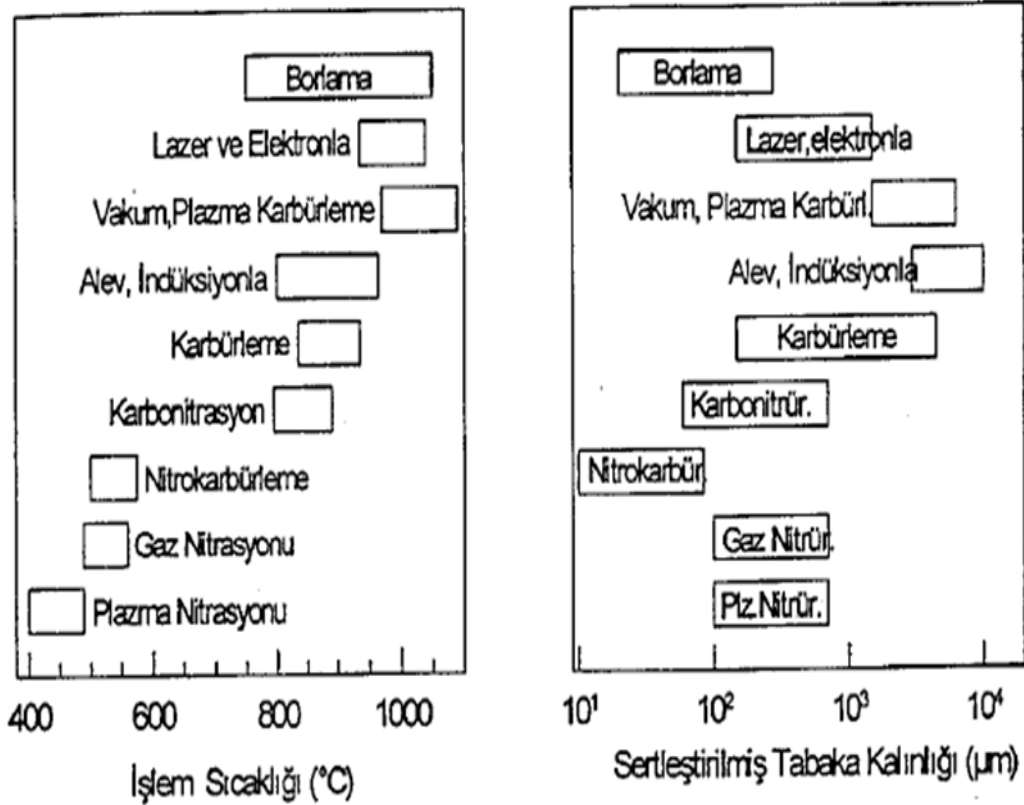
2.2. Borlama İşlemi

Yüzey mühendisliği, son yıllarda endüstriyel sahada geniş uygulama alanı bulmuştur, bu sayede aşınma problemine çözüm üretilebilmektedir. Yüzey işlemleriyle malzemenin yorulma, sertlik gibi mekanik özellikleri yanında, oksidasyon, sürtünme ve aşınma ve korozyon özellikleri geliştirilmektedir. Malzeme dizaynında, korozyon ve aşınma gibi özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekir. Sürtünerek çalışan makine elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden karbürleme, nitrürleme, borlama yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [52].

Borlama işlemi yüzeyden belli bir kalınlığa kadar bor atomlarının yayındırılması esasına dayanan bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. İşlem çok çeşitli ortamlarda, 700 ila 1000 °C sıcaklık aralıklarında 1 ila 12 saat süre zarfında yapılmaktadır. Borlama işlemi, takım çelikleri yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, temperlenmiş çelikler, yüzeyi sertleştirilmiş çelikler, paslanmaz çelikler, döküm çeliklere, sfero ve gri dökme demirlere, sinterlenmiş metal tozlarına, nikel, kobalt, molibden ve titanyum gibi demir dışı alaşımlara uygulanabilmektedir [3].

Borlu tabakanın özellikleri, borlama sıcaklığına, süresine, borlanan çeliğin bileşimine, ve ısıtma işlemine bağlıdır. Borlamayla çelik yüzeyinde oluşan tabaka çok serttir sonradan bir sertleştirme işlemine gerek duyulmaz. Borlu tabakada bor Fe_2B ve FeB şeklinde bulunur. Bor, çeliklerde alaşım elementi ve yüzey sertleştirici ve ayrıca çelik üretiminde cüruf yapıcı olarak da kullanılır.

Son yıllarda, sert seramik kaplamalarının çeşitli mühendislik parçalarının yüzeylerinde kullanılması hızla artmaktadır [51]. Korozyona, aşınmaya ya da her ikisine birden dayanıklı malzemelere karşı artan ilgi sebebiyle yüzey modifikasyon teknikleri faaliyetlerinde hızlı bir artış görülmektedir. Geçiş metalleri üzerinde oluşan karbürler, nitrürler ve borürler yüksek sertlik, mükemmel aşınma, sürtünme ve korozyon dirençleri sebebiyle bu gibi uygulamalar için uygun oldukları uzun yıllardan beri bilinen bir gerçektir. Bu nedenle borlama konusunda dünya genelinde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [6,7]. Borlama ile yüksek sertliğe ve düşük sürtünme katsayısına sahip yüzeyler oluşturmanın yanında aşınma dayanımına sahip ve birçok korozif ortama da dayanıklı tabakalar üretilir. Dünya bor kaynaklarının önemli bir kısmını barındıran ülkemizde de borlama işlemleri geliştirilmeli ve kullanımı yaygınlaştırılmalıdır [8].



Şekil 2.1. Çeliklere uygulanan sertleştirme işlemlerinin mukayesesi [53].

Yüzey işlemlerinin uygulama alanının en geniş olduğu demir esaslı alaşımlarda, yüzey modifikasyonu için kullanılan difüzyon esaslı metodların sertlik derinliği ve işlem sıcaklığına bağlı olarak mukayesesi Şekil 2.1’de görülmektedir.

Bor tabakasının en büyük avantajı bu yöntemle çok yüksek sertlik değerlerine (1450-5000 HV) ulaşılabilmesi ve bor tabakasının yüksek sıcaklıklarda dahi sertliğini korumasıdır. Borlanmış çeliklerde oluşan sertlik değerleri ile diğer yüzey sertleştirme işlemlerinde elde edilen sertlik değerleri Tablo 2.1’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1. Çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri [3].

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ seramikler	1730
Sialon seramikler	1768
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	10000

Oluşan bor tabakasının sertliği ile geleneksel sertleştirme yöntemlerinde elde edilen sertlik değerleri arasındaki büyük fark açıkça görülmektedir. Borlama ile elde edilen değerler, sertleştirilmiş takım çeliğinden ve sert krom kaplamadan daha yüksek olup, volframkarbür ile eşdeğerdir.

2.3. Borlama İşleminin Avantajları

Termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama işlemi şu özellikleri ile öne çıkmaktadır:

- Borlama işleminde oluşan borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000Hv) ve ergime noktasına sahip olması en önemli avantajdır [3]. Bu sebeple borlanmış çelikler, nitrülenmiş ve karbürlenmiş çeliklerden daha yüksek performans gösterirler. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyonda oluşturulan tabakalara nazaran çok daha yüksektir. Hatta bu sertlik değeri, sertleştirilmiş takım çeliklerinin ve sert krom kaplamanın sertlik değerlerinden daha yüksek, tungsten karbürün sertlik değerine ise çok yakındır.
- Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayılarından dolayı abrazyon aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler. Temel aşınma mekanizmalarının (tribo-oksidasyon, adhezif, yüzey yorulması, abrazyon) oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlarlar.
- Borlu tabakaların iyi aşınma özelliği göstermesi, yağlayıcı kullanımı da azaltır.
- Borür tabakası, 550–660°C sıcaklıklarda bile sertliğini koruyabilmektedir.
- Isıl işlem uygulanabilen malzemeler performanslarını optimize etmek için borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.
- Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillerine üniform bir şekilde uygulanabilir
- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850°C), orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.

- Oksitleyici ve korozif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü ve kullanım performansını artırır
- Borlama yüzeyi, çok hassas bir şekilde parlatılabilir.
- Oksitleyici ve korozif ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır.
- Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCL gibi asitlere karşı direncini arttırmak mümkündür [53,12].

2.4. Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin sağladığı üstün özellikleri yanında şu dezavantajları vardır:

- Borlama teknikleri esnek değildirler. Gaz ortamında sementasyon ve plazma nitürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işletim ve işçilik maliyeti daha yüksektir. Daha esnek olan gaz karbürizasyon ve plazma nitürasyonu işlemlerinin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Buna rağmen; yüksek sertlik ve kalıcı yüksek aşınma ve korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Ucuz iş gücü temin edilebilen yerlerde de borlama, tercih edilen bir işlemdir.
- Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 μm 'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25–6,25 μm 'lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır. Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkün olmaktadır. Çünkü yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi sırasında kaplama tabakasında kırılmalar meydana gelmektedir. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- Boraks esaslı elektrolitik veya elektrolitik olmayan diboran ve sıvı ortam gibi hidrojen bileşimli gaz ortamlarda yapılan borlama işlemlerinde, parça yüzeyinin kirlenmesi, pratik uygulamalar açısından bir dezavantaj olarak görülmektedir.

- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri, yüksek basınçlı yüzeylerde (2000N) karbürizasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dışlı üretiminde bir sınırlama söz konusudur.
- Borlanmış numunelerin H_2SO_4 gibi oksitleyici olmayan asitlere karşı korozyon direnci oldukça iyi iken, HNO_3 gibi oksitleyici asitlere karşı kötüdür. Yüzeyde korozyon direncini borlu tabakada yer alan kromboridin iyileştirdiği düşünülmektedir.
- Borlama sonrası ısıl işlem görecektir olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir
- İşlem sonucunda parçanın ölçülerinde (borlama tabakasında % 5-25'i kadar hacim genişlemesi olduğu için) değişimler olur [3,53,12].

2.5. Borlama İşlemleri

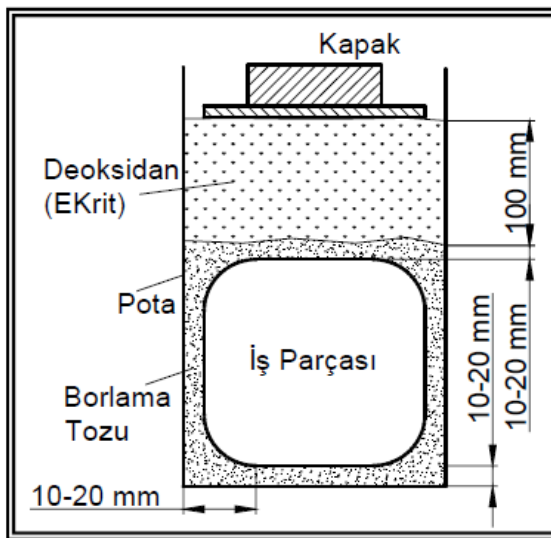
Son teknolojik gelişmeler ışığında borlama işlemleri, termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılabilir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama yöntemlerinde sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun altlık malzemeye difüzyonu sağlanmaktadır. Bu yöntemler; katı, sıvı, gaz ortamlarda yapılan borlama ve pasta borlama şeklinde sıralanabilir. Termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme gibi yöntemler ile de son yıllarda borlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir [3,13].

2.5.1. Kutu borlama işlemleri

Kutu borlama işlemi, borlanacak parçanın, bor verici ortam olarak ısı yalıtımlı çelik kutular içindeki toz karışımı içerisinde belli sıcaklıkta ve belli sürelerde bekletilmesi esasına dayanmaktadır [14]. İşlem sıcaklığı borlanacak malzemeye göre 840-1050 °C, işlem süresi ise 1-8 saat aralığında olmaktadır. Bunun yanında işlem süresini etkileyen bir diğer faktör ortamın reaktifliğidir. Potanın (kutu) içerisinde hazırlanan toz karışımı borlanacak parçanın etrafını en az 10-20 mm kaplayacak şekilde

yerleştirilir. Borlama tozlarının üzerine SiC gibi bir dolgu malzemesi doldurulur. Üst kısma kapatılan bir kapak ile hava girişini dolayısıyla oksitlenme engellenir. Pota hacminin, fırın hacminin % 60'nı geçmemesine dikkat edilir. Bunun nedeni ısıtıcılara yakın olması nedeniyle, potada meydana gelebilecek yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve pota yüzeyindeki malzeme dökülmelerini önlemektir. Bunun yanında işlem sırasında yeniden toz ilavesinin (% 20-50) gerektiği durumlarda borlamaya devam edilebilmesi içindir.

Yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri ferrobör, bor karbür (B_4C) ve amorf bördür. Amorf bor ve ferrobör çok iyi bor verici malzemeler olmakla birlikte kalın borür tabakası oluştururlar. Endüstriyel uygulamalar için sadece bor karbür kullanılmakta olup fiyatı hem nispeten daha ucuzdur hem de kalitesinde bir değişim söz konusu değildir SiC ve Al_2O_3 çözünmeye yardımcı olur. Aktivatör olarak $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ kullanılır. Aktivatörün fonksiyonu, çelik yüzeyine gaz fazında borun geçişini sağlamaktır. İşlem sonu fırından çıkartılan kutuların soğutulması hızlı (kutunun üzerine su dökülerek soğutulması) veya yavaş (fırın dışında veya içinde kutunun bekletilmesi) olarak sağlanabilir. Paslanmaz çelik, alaşımsız çelik, veya alümina kutular kullanılabilir. Homojen bir ısı dağılımı için borlanacak parçaların şekli fırına uygun olmalı ve yerleştirme bu durum göz önüne alınarak yapılmalıdır [12,14,15]. Katı ortam borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Katı borlama işleminin şematik gösterimi [15].

Literatürde karşılaşılan toz karışımları ve ağırlıkça bileşimleri [3,13]:

- % 5 B₄C, % 90 SiC, % 5 KBF₄
- % 50 B₄C, % 45 SiC, % 5 KBF₄
- % 85 B₄C, % 15 Na₂CO₃
- % 95 B₄C, % 5 Na₂B₄O₇
- % 84 B₄C, % 16 Na₂B₄O₇
- Amorf bor (% 95–97), % (3-5) KBF₄
- % (40–80) B₄C, % (20-60) Fe₂O₃
- % 60 B₄C, % 5 B₂O₃, % 5 NaF, % 30 demir oksit
- % 50 Amorf bor, % 1 NH₄F.HF, % 49 Al₂O₃
- % 100 B₄C
- % 20 B₄C, %5 KBF₄, % 75 Grafit
- % 95 Amorf bor, % 5 KBF₄,

Katı ortamda kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Katı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri [3,13].

Malzeme	Formülü	Teorik Bor Oranı (%)	Molekül Ağırlığı	Erime Sıcaklığı (°C)
Bor Karbür	B ₄ C	77,28	55,29	2450
Amorf Bor	B	95-97	10,82	2050
Ferro Bor	Fe-B	17-19	-	-

Bor atomlarının malzeme yüzeyine daha iyi bir şekilde yayınabilmesi için, malzeme ve bor bileşenleri arasında geniş bir temas yüzeyi olması istenir. Bu yüzden borür tabakasının oluşumunda, borlama tozunun tane boyutu ve özellikleri önemli faktörlerdir.

Borlama işlemi, uygun bir toz karışımı ile yapılabileceği gibi değişik ticari toz karışımları ile de yapılabilmektedir. Bu karışımlardan ekabor borlama ürünlerinin özellikleri Tablo 2.3’de görülmektedir.

Tablo 2.3. Ekabor tozlarının özellikleri [13].

Tip	Tane Boyutu (μm)	Yoğunluk Kompakt, gr/cm^3	Özellik
Ekabor1	≤ 150	1,90	Birlikte bağlanmaya eğilimli; Yüzey kalitesi en yüksek tabaka için
Ekabor2	≤ 850	1,70	İşlem sonrası parçadan kolaylıkla ayrılma; Mükemmel yüzey kalitesi
Ekabor3	$\leq 1,400$	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; işlem sonrasında dahi toz akıcılığı iyidir
Ekabor HM	≤ 150	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için
Ekabor WB	220–350	0,95	Oksijensiz gaz atmosferde, akışkan yatakta borlama için
Ekabor Pasta	-	1,90	Daldırma, fırça ile sürme ve püskürtme ile uygulanabilir, inert gaz altında çalışılmalı
EKrit	≤ 420	1,55	Örtü malzemesi, borlama süresince toz borlama ürünlerine oksijen sızmasını

Altlık malzemenin borlanması borlama sıcaklığı ve süresi ile ısıtma hızı önemli rol oynar. Özellikle 700-800°C arasındaki bölge çok önemlidir. Çünkü alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde bile bor atomlarının difüzyon hızı 800°C 'nin yukarısında ki sıcaklıklarda teknik olarak kullanılabilir borür tabakasının üretimi için yeterli bir büyüklüğe ancak erişir. Diğer taraftan 700°C'nin üzerinde termokimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen aktif borun konsantrasyonu sürekli bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle hızlı ısıtma ile bu sıcaklık aralığının yukarısına hızlı bir şekilde geçilmedikçe, bor atomları parça yüzeyinde birikerek ve FeB fazının oluşumunu sağlayacaktır. İnce tabakalarda bazı problemler oluşturan bu FeB fazı ise borlamanın daha ileri safhalarında giderilemeyecektir. Termal iletkenliğinin kötü olmasından dolayı gerekenden daha fazla miktarda toz kullanımı bu sebeple tavsiye edilmemektedir [13].

2.5.1.1. Çok bileşenli borlama

Çok bileşenli borlama bor elementiyile birlikte alüminyum, silisyum, vanadyum, krom, ve titanyum gibi metalik elementlerden bir veya birkaçının çelik yüzeyine aynı anda veya birbiri ardına yayındırılması esasına dayanan termokimyasal bir yöntemdir [13].

İşlem, katı ortamda yapılabildiği gibi sıvı borak ortamında da yapılabilmektedir. Çok bileşenli borlama genellikle 850-1050 °C sıcaklık aralığında iki kademeli bir işlem olarak gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada borlama işlemi, geleneksel yöntemlerden biri ile yapılmaktadır ve daha ziyade kutu borlama tercih edilmektedir. FeB fazının oluşumu iyi sonuçlar vermekte ve 30 µm civarındaki kaplamalar yeterli olmaktadır. İkinci aşamada, elementin tabakaya difüzyonu gerçekleştirilmektedir. Kutu borlama sırasında oluşan sinterleşmeyi önlemek amacıyla ortamdan Ar veya H₂ gazı geçirilmektedir. Çok bileşenli borlama, bor-kromlama, bor-krom-titanyumlama, bor-krom-vanadyumlama, bor-alüminyumlama, bor-silisyumlama ve bor-vanadyumlama şeklinde altı gruba ayrılmaktadır [15].

Bor-kromlama işlemi ile bor-alüminyumlama işleminden daha yüksek oksidasyon direncine ve geleneksel borlamadakinden daha iyi korozyon ve yorulmalı korozyon direncine ulaşılmaktadır. Bor-kromlanmış parçaların ısıtma işlemleri, bu sebepten dolayı kontrollü atmosfer gerektirmeksizin yapılabilmektedir. Bor-silisyumlama ile işlem gören parçaların yorulmalı korozyon dirençlerinde artış sağlanırken, bor-alüminyumlama ile nemli ortamlarda daha iyi korozyon ve aşınma direncine sahip parçalar elde edilmektedir. Bor-krom-titanyumlama işlemi sonrasında parça yüzeyinde 5000 kg/mm² (HV) sertlik değerine sahip titanyumborür oluşmakta, bu da çok yüksek abrasif aşınma ve korozyon direnci sağlamaktadır. Bor-vanadyumlama ve bor-krom-vanadyumlama işleminde sertliği 3000 kg/mm² (HV) olmasına rağmen, oldukça sünek tabakalar elde edildiğinden bu işlem darbeli yüklemelere maruz kalacak olan parçalara uygulanabilmektedir [3,12].

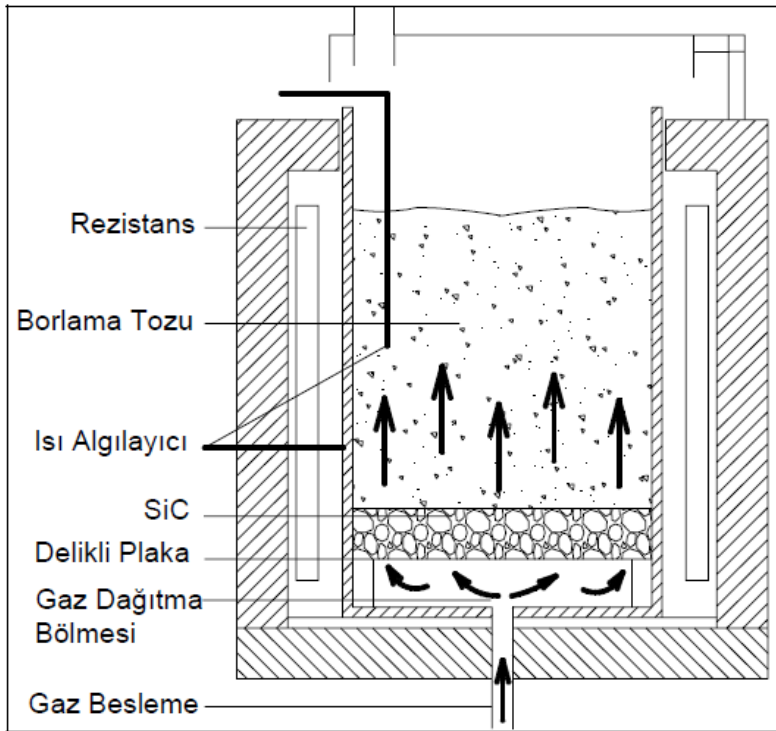
Son yıllarda bu sayılan çok bileşenli borlama tekniklerine, bor-karbürleme (borocarburing) ve bor-karbürleme-nitrürleme (borocarbonitriding) yöntemleri de eklenmiştir [18].

2.5.1.2. Akışkan yatakta borlama

Akıcı ortam olarak özel borlama tozu (Ekabor WB veya iri taneli SiC parçacıkları gibi) kullanılan akışkan yatakta borlama yöntemi, Katı ortam borlama işlemlerinin bir alt dalıdır. Oksijensiz gaz (N₂-H₂ karışımı) kullanılarak borlama tozu akışkan hale

getirilir. Borlama işlemi, borlama tozu ve oksijensiz gazın taban malzemesini içeren akışkan bir yatak içerisinde gerçekleştirilir [3,17]. Bu yöntemin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yayınma doğrudan ve kolay gerçekleşmekte, ısı ve gaz sirkülasyonu yüksek seviyede olmaktadır. Bu sebeple işlem süresi kısadır.
- Hareketli partiküller borlanan parça ile çevresi arasında ısı taşınımını yüksek seviyelere getirmekte böyle mükemmel termal kararlılık ortaya çıkmaktadır.
- İşlem sırasında homojen sıcaklık oluşmaktadır.
- Parça işlem sıcaklığına hızlı bir şekilde ısıtılabilmekte ve daha kısa süreli işlem göreceğ malzemeler doğrudan dışarı alınabilmektedir.
- Sürekli ve otomatik çalışma imkanına sahiptir. Borlanacak parçalar aralıklı bir şekilde şarj edilebilir ve fırından dışarı alınabilir.
- Borlama sonrasında parçaya doğrudan su verilebilme imkanı sayesinde borlama ve su verme işleme tek kademeye indirgenebilmektedir.
- Maliyeti diğer yöntemlere nazaran uygundur.
- Kitlesele üretilmiş parçaların işlemlerinde zaman ve enerji tasarrufu sağlar.



Şekil 2.3. Akışkan yatağta borlama işleminin şematik gösterimi [15].

Akışkan yatakta borlama işleminin önemli bir dezavantajı damıtma kabı içerisindeki damıtma maddesinin soygaz vasıtasıyla sürekli çalkalanmasıdır. Atık gazlar zenginleşmiş florür ihtiva etmektedirler ve kesinlikle temizlenmelidirler. Kuru CaCO_3 kalıntıları ile dolu bir emici ile ya da titreşimli bir havalandırma tesisatı ile atık gazların oranı azaltılabilir, böylelikle çevre problemlerinin önüne geçilebilir. Fakat bu durum ilave masraflara sebebiyet verecektir [3,12].

2.5.1.3. Pasta borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor, daha pahalı olduğu veya zaman kaybının istenmediği durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Kitlesele üretilmiş veya karmaşık şekilli parçaların tamamen veya kısmen seri bir şekilde borlanması, borlama pastası ile yapılabilmektedir. Bu veya geleneksel borlama toz karışımı $\text{B}_4\text{C} + \text{SiC} + \text{KBF}_4$ iyi bir bağlayıcı ajan ile (metil selülozun sulu çözeltisi gibi) uygulanmaktadır. Hazırlanan borlayıcı karışım (pasta) malzemenin üzerine sürülerek veya püskürtülerek 1-2 mm civarında kalınlıkta tabaka oluşturulmakta ve sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150°C 'de kurutulmaktadır. Gerektiği takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir.

İşlem demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda $800-1000^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış ($800-1000^\circ\text{C}$) fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur. Pasta borlama yöntemiyle borlama, mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılmalıdır. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. İşlemden koruyucu atmosfer olarak Ar, NH_3 veya N_2 kullanılmaktadır [53,12,15]. Pasta borlama işleminde 1000°C 'de 20 dakika süre sonunda $50\mu\text{m}$ kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir. Büyük parçaların veya seçilmiş belli alanların borlanması için oldukça elverişlidir [19].

2.5.2. Sıvı borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 700-1000 °C aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, elektrolitik olan ve olmayan sıvı borlama olarak iki ana grupta toplanmaktadır. Sıvı borlama metalik malzemelerin bor kompozisyonlu erimiş tuz banyosuna daldırılmalarıyla yapılmaktadır. Erimiş tuz banyosu değişik oranlarda B₄C, BaO, KCl, NaCl içerir. BaO ilavesi difüzyonu önemli ölçüde iyileştirmektedir. Oluşan borür tabakalarının tipik kalınlıkları 100-200 µm'dir. Sıvı ortamda borlama, elektrolizle sıvı borlama ve elektrolitik sıvı borlama olarak iki ana grupta toplanmaktadır.

Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların elde edilmesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Yapılan araştırmalarda borür tabaka kalınlığının borlama süresi, borlama sıcaklığı ve akım yoğunluğundaki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi 900–950°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Tuz banyosunda elektrolitik borlama işleminde, katot olarak borlanacak demir esaslı malzeme, anot olarak grafit ve elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların elde edilmesinde yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun sürelerde borlama işlemi gerekmektedir. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edilebilmesi için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir.

Bu yöntemin dezavantajları arasında şunlar sayılabilir:

- Borlama sonrasında parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor vardır. Bunların giderilmesi zaman ve para kaybına yol açabilir.
- Borlamanın başarılı olabilmesi borlama sırasında banyo viskozitesinin artmamasına bağlıdır. Bu sebeple sıvı banyoya tuz ilavesi yapılmaktadır ki bu da maliyeti artırmaktadır.

- Korozyon ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç vardır
- Yöntemin zehirli olabilmesi ve çevre kirliliğine yol açabilmesi bir diğer dezavantajdır [10,3,53,12].

2.5.3. Gaz borlama

Boron hidritlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Bu yöntem karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir. Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir. Gaz borlama işlemi şu avantajları sağlamaktadır:

- 1- Gaz borlama işleminde bor potansiyeli ayarlanabilmektedir. Böylece tek fazlı bir borlu tabaka elde etmek mümkün olmaktadır.
- 2- Gaz borlama işlemi sonucunda parçalar temiz yüzeyli olarak elde edilmektedir. Bu sebeple borlanmış malzemenin yıkanmasına gerek yoktur.
- 3- Gaz borlama işleminde bor dağılımının üniform olması sebebiyle homojen kaplama kalınlıkları elde edilmektedir [12].

Gaz borlamada en çok kullanılan ortamlar aşağıda şunlardır:

- Diborane (B_2H_6)- H_2 karışımı,
- $(CH_3)_3B$ ve $(C_2H_5)_3B$ gibi organik bor bileşikler,
- Bor halid- H_2 /veya (75:25 N_2 - H_2)gaz karışımı.

Gaz fazında borlama işlemi kompleks ekipmanlar gerektirmektedir. Halbuki proses kendi içerisinde oldukça basittir. Fakat dezavantajlı olduğu üç durum vardır:

- Son derece tehlikeli olan hidrojen siyanürün zehirlilik sınırı 10 ppm iken diboranın zehirlilik sınırı 0,1 ppm'den düşüktür.
- Hidrojen ile seyreltilse bile diboran oldukça pahalıdır.
- Bor halojenürleri korozyona sebep olurlar ve istenmeyen metal halojenürler meydana gelmektedir [53,12].

Gaz borlama işlemi en çok BCl_3 tercih edilmektedir. Parça, gaz borlamaya tabi tutulacağı zaman BCl_3+H_2 gaz karışımında 700-950 °C arasında ve 67 KPa basınç altında borlanmaktadır. Son çalışmalar, H_2 yerine 3:1 oranında $\text{N}_2:\text{H}_2$ kullanılmasıyla FeB fazının azaldığını ve daha iyi kalitede tabakaların elde edildiğini göstermiştir. Bu işlem titanyum ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir BBr_3 çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF_3 'e ihtiyaç duyulması sebebiyle kullanım açısından tercih edilmemektedir. $(\text{B}_2\text{H}_6)-\text{H}_2$ (diborane) karışımı, zehirli ve patlayıcı olma özellikleri sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik malzemeler kullanıldığı takdirde borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır [3,53,12].

2.5.4. Plazma borlama

Tuz banyosunda ve gaz ortamda borlamanın neden olduğu bazı problemlerden dolayı (örneğin çevre kirliliği, zehirli ve patlayıcı olma özellikleri gibi) değiştirilmiş, yenilenmiş borlama prosesleri geliştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi de plazma borlama işlemidir.

Maddenin katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere 4 hali vardır. Bu haller arasındaki asıl fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin konumunun değiştirilmesi, verilecek enerji ile ilgilidir. Örneğin katı haldeki bir maddeye, enerji vererek sıvı, sıvı halde iken enerji vererek gaz ve gaz durumundaki maddeye de belirli bir enerji vererek plazma haline geçirmek mümkündür. Bu işlemin tersi de yapılarak yani verilen bu enerjileri geri alarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren bir karışımdır. Pratikte plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. Plazma elde etme yöntemlerinin en önemlisi ve en yaygın olarak kullanılanı elektriki boşalmadır. Elektriki boşalma mekanizmasında bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde, tatbik edilen gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik boşalması olur ve bu iki iletken plaka arasında bir elektrik akımı akışı olarak gerçekleşir. Akan akımın büyüklüğüne göre ortaya çıkan elektrik boşalma sistemleri sınıflandırılabilir [15].

Bu işlem, 800–1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde, Ar, H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃ veya B(OCH₃)₃ (trimetilborat) kullanarak, yapılan borlamadır işlemidir. Bu alanda olarak yaklaşık 20 yılı aşkın süredir çalışılmasına rağmen, henüz tam olarak anlaşılammıştır. Mikroyapı ve demir bor tabakalarının büyümesi gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem sıcaklığı, , işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir [20].

Borlamanın yapıldığı plazma içerisinde yer alan B ve Cl iyonlarının işlem üzerinde çok önemli tesiri vardır. En iyi işlem, düşük Cl iyonu yoğunluğu ve maksimum B iyonu yoğunluklarının olduğu plazmada ortaya çıkmaktadır. Yüksek Cl iyonu yoğunluğu plazma şiddetinde düşüğe, borür tabakası üzerinde Cl ve B birikmesine (kaplanmasına) ve mikroyapıda gözenekliliğe sebep olur. Klorun ayrıca difüzyonu engelleme etkisi de söz konusu olup, iyi özelliklere sahip borür tabakası elde etmek için B/Cl oranının yüksek olması gerekmektedir. Gözeneksiz yapı eldesi bu şekilde mümkün olmaktadır [21].

Geleneksel borlama işlemlerine göre birçok avantajları vardır: Yüksek enerji verimliliği, işlem sıcaklığının düşük olmasından dolayı parçadaki çarpılmaların minimuma indirilebilmesi, yüksek sıcaklık fırınları ve ekipmanlarını gerektirmemesi, bor tabakasının kalınlığı ve kimyasal kompozisyonunun kontrol edilebilirliği bu avantajlar arasında sayılabilir.

Yöntemin sınırlamaları, bor verici kaynak olarak kullanılan B₂H₆ ve BCl₃ gazlarının son derece zehirli, pahalı ve patlayıcı olması, BCl₃'ün vakum odasında korozyon meydana getirmesi sayılabilir. Bu problemi gidermek için plazma pasta borlama işlemi geliştirilmiştir. Pasta, amorf bor ve boraks ile hazırlanır. Pastadan plazma yöntemiyle elde edilen aktif bor, demirin içerisine yayındırılır [3,15].

2.6. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri

Borlama işlemi, yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, temperlenmiş çelikler, takım çelikleri, korozyona dayanıklı çelikler, armco demiri, gri dökme demir, küresel

grafitli dökme demir gibi çok geniş bir yelpazedeki demir esaslı alaşımların hemen hepsine ve krom, nikel, kobalt, titanyum, molibden, mangan gibidemir dışı metal ve alaşımlarına uygulanabilmektedir. Altlık malzemesinin türüne göre borlama işlemi 800 - 1000 °C sıcaklık aralığında yapılmaktadır. Ancak gri dökme demir ve sert metallerde bu kadar yüksek sıcaklıklara çıkılamamakta, Gri dökme demirlerin borlanmasında ise 850-880 °C sıcaklık aralıklarında yapılabilmektedir [13,22].

Borlama işleminin ostenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çelikler, borlama sonrasında anında sertlik kazanırlar. Suda sertleşen parçalar, borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanamazlar. Benzer şekilde kükürtlü ve kurşunlu çelikler yüzeyde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamaktadır. Tablo 2.4'te toz ortamda borlanan bazı malzemelerin borlama sıcaklıkları ve elde edilebilecek optimum tabaka kalınlıkları verilmiştir [3,13].

Tablo 2.4. Toz ortamda borlanan bazı malzemelerin borlama sıcaklıkları ve elde edilebilecek optimum tabaka kalınlıkları.

Malzeme No	DIN	AISI	Borlama Sıcaklığı (°C)	Tabaka kalınlığı (µm)
1,0037	St 37-2		900-1000	50-500
1,0050	St 50-2		900-1000	50-500
1,1141	Ck 15	1020	900-1000	50-500
1,1191	Ck 45	1042	900-950	40-200
1,7131	16 MnCr5	5115	880-950	40-200
1,8159	50 CrV4	6152	880-900	15-150
1,8519	31 CrMoV7		880-900	15-150
1,4541	X10CrNiTi 18 10		880-980	20-60
1,4571	X10 CrNiMoTi 18 10	D3	880-980	20-60
1,2080	X210 Cr 12		940-980	40-80
1,2162	21 MnCr 5		880-950	40-200
1,2312	40 CrMnMoS 8 6		880	40-120
1,2316	X 35CrMo 17		1010-1030	40-100
1,2379	X 155 CrVMo 12 1	D2	1020-1050	40-80
1,2436	X 210 CrW 12	D6	940-980	40-80
1,2764	X 19 NiCrMo 4		880-920	40-150
1,2787	X 22 CrNi 17		950	20-60
1,2842	90 MnCrV 8	O2	880-900	40-150
	GGL 25		850	40-200
	GGG 60		850	40-200
	Sert Metal GL20		Max. 880	10-30

Alüminyum, silisyum ve azotlu yatak çelikleri kırılğan borür fazları oluşturmaları sebebiyle borlamaya uygun değildir. Buna ek olarak içerdikleri kükürt ve kurşun alaşım elementleri borür tabakasının kalkması ve çatlaması gibi sorunlar ortaya çıkarmaktadır [23]. Bu malzemelerdeki Al ve Si borür tabakasında çözünemez ve bor atomlarının difüzyonu sırasında yüzeyden içerilere doğru itilirler. Difüzyon bölgesinde Fe_2B fazının önünde birikerek, ferritik yapıya sahip bir bölge oluştururlar. Bu ferritik bölge çok yumuşaktır ve sertleştirilemez [3,12]. Bunun sonucu olarak son derece sert borür tabakasının altında orijinal altlık malzemedenden daha yumuşak bir tabaka yer alacaktır. Eğer iş parçası, oldukça yüksek gerilmelere maruz kalırsa, sert borür tabakası bunu yumuşak ferrit bölgesine itecek ve borür tabakasının parçalanmasına (yumurta kabuğu etkisi) yol açacaktır [3,13].

Titanyum ve alaşımlarının borlanması kutu borlama yöntemi ile yüksek vakumda (0,0013 Pa) ve yüksek saflıkta argon kullanılarak 1000-1200 °C sıcaklık aralığında oksijensiz amorf bor ortamında yapılmaktadır. Gaz borlama yapılacağı durumda ise BCl_3 - Ar gaz karışımı kullanılmaktadır. Borlama sonucu aşınmaya karşı oldukça dayanıklı, %18 bor ağırlık yüzdesi ile TiB , % 30-31 bor ağırlık yüzdesi ile TiB_2 ve Ti_3B_4 titanyum borür tabakaları oluşmaktadır [23].

Çeliklerin borlama işleminde bor'un yüzeye yayılması sonucu parçanın en üst yüzeyinde borür tabakası adı verilen borlu bölge, onun altında yer alan yayınma (difüzyon) bölgesi ve en iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır. FeB ve Fe_2B olmak üzere iki demir-borür fazı oluşur. Bu fazların oluşturduğu tabaka, dışlı bir şekilde difüzyon tabakasına gömülmüştür. Borür tabakasında FeB fazı üstte, Fe_2B fazı ise onun altında yer almaktadır. En yüksek aşınma dayanımının Fe_2B fazından oluşan tabakalarda elde edilmektedir. Ayrıca yüksek iç gerilmeye sahip olduğundan ve Fe_2B tabakasından kavlayarak döküldüğünden FeB fazı arzu edilmez. Fakat böyle durumlarda difüzyon tavlmasına gidilebilir. Tablo 2.5'te çeşitli altlık malzemelerinin borlanması sırasında oluşan borürlerin ergime sıcaklıkları ve mikro sertlik değerleri verilmektedir [24,25].

Tablo 2.5. Çeşitli altlık malzemelerinin borlanması sırasında oluşan borürlerin ergime sıcaklıkları ve mikro sertlik değerleri [3].

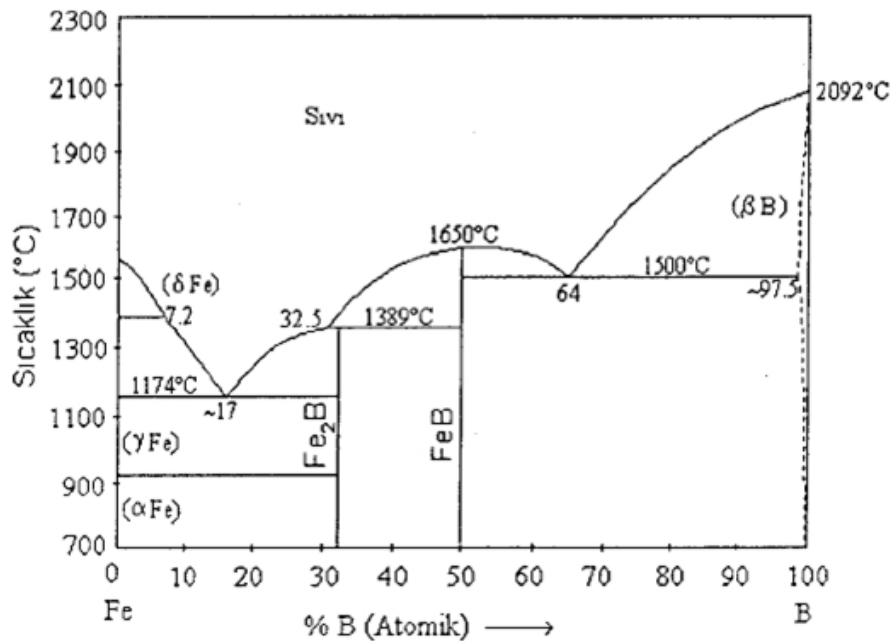
Altlık malzeme	Borür tabakasındaki sürekli faz	Tabaka Sertliği (HV)	Eriye Sıcaklığı (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	
Co	CoB	1850	
	Co ₂ B	1500-1600	
	Co ₄ B	700-800	
Co-2.75 Cr	CoB	2200 (100 gr)	
	Co ₂ B	~1550 (100 gr)	
	Co ₄ B	700-800	
Ni	Ni ₄ B ₄	1600	
	Ni ₂ B	1500	
	NiB	900	
İnco 100		1700 (200 gr)	
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
Ti	TiB	2500	~1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB		
	TiB ₂	3000 (100 gr)	
Nb	NbB ₂	2200	3050
	NbB ₄		
Ta	Ta ₂ B		3200-3500
	TaB ₂	2500	
Hf	HfB ₂	2900	3250
Zr	ZrB ₅	2250	3040
W	W ₂ B ₅	2600	2300

Çeliklerin borlanması istenmeyen yüzeyleri veya bölgeleri, asbest, bakır, SiC, Al₂O₃ veya benzeri ticari ürünlerle kaplanarak kısmi borlama yapılabilir [5]. Bakır atomları, bor atomlarının difüzyonuna engel olduğu için bakır veya bakır alaşımları borlamaya uygun değildirler. Fakat bölgesel borlama işleminde borlanmayacak kısımların maskelenmesinde kendinden yapışan ince film veya sac olarak kullanılırlar. İşlem sıcaklığı 950°C'nin üzerine çıkarsa, Ekabor bileşimindeki bileşikler ile bakır arasında ötektik reaksiyonu sonucu erime meydana gelir. Bakır ile korunan parçaların borlanmasında bu yüzden 930°C'nin yukarısına çıkılmamalıdır [12].

2.6.1. Fe-B denge diyagramı

Elementlerin demirde çözünme kabiliyetleri, çözücü ve çözünen atomların izafi büyüklükleri ile belirlenmektedir. Demir alaşımlarında alaşım elementlerinin, genellikle atom çaplarına bağlı olarak arayer ve yeralan element olarak eriyebileceği bilinmektedir. Bu gerçekten hareketle, bor α -Fe'de hem yeralan hem de arayer pozisyonunda olabilmektedir. Ayrıca Fe-B sisteminde borun atom çapının demirin atom çapından %27 oranında daha küçük olması, bu elementle katı eriyik yapma imkanı sağlamaktadır [27]. Düşük sıcaklıklarda demir içerisinde bor çözünürlüğü mukayese edildiğinde 1/50 oranında ara yer atomu olarak, büyük oranda ise yer alan atomu olarak eridiği görülmüştür. α -Fe'de borun difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi 62 kcal/mol olarak tespit edilmiştir [13,27].

Şekil 2.4'te görülen denge diyagramında demir ile bor arasında Fe_2B (ağırlıkça %8,83B) ve FeB (ağırlıkça %16B) bileşikleri oluşmaktadır. Ötektik reaksiyon bor difüzyonunun hakim olduğu γ -Fe tane sınırlarında ve/veya Fe_2B , $\text{Fe}_3(\text{C,B})_2$ de başlamaktadır. Ötektik yapı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın soğuma hızına bağlıdır. Yüksek soğuma hızında ince mikroyapı, yüksek sertlik ve tokluk elde edilmektedir [13].

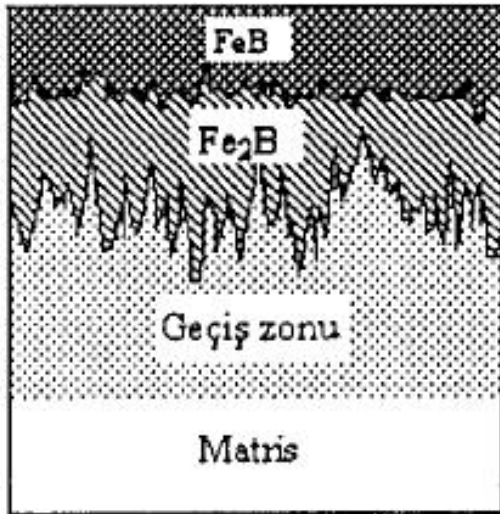


Şekil 2.4. Fe-B denge diyagramı [19].

Borlayıcı bileşenlerden metalik kafese doğru bor atomlarının difüze olmakta ve akabinde absorpsiyonu ile süreye bağlı olarak hem tek fazlı (Fe_2B) hem de çift fazlı (FeB ve Fe_2B) borür tabakaları oluşmaktadır [12,28]. Tabakanın özelliklerini büyük ölçüde bu iki borür belirlemektedir.

2.6.2. Borür tabakasının yapısı, bileşimi ve kalınlığı

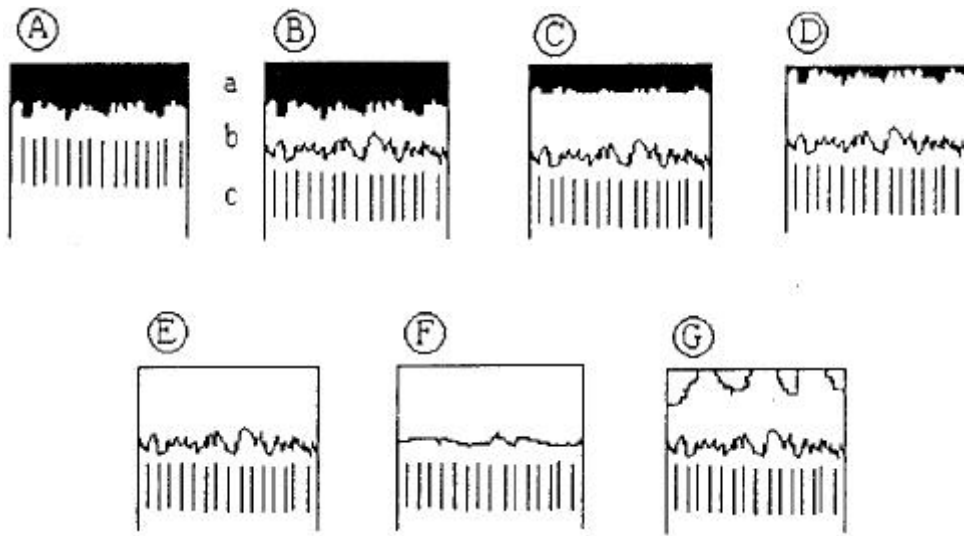
Borür tabakalarının özellikleri, borlama ortamının bileşimine, borlama metoduna, borlanan malzemenin kimyasal bileşimine, işlem sıcaklığı ve süresi gibi işlem parametrelerine bağlı olup, borür tabakası ya düz bir formda ya da dişli/kolonsal formda olabilmektedir. Borlama işlemi sonucunda çeliklerde başlıca iki tabaka meydana gelmektedir. Bunlar, borür tabakası ve geçiş zonedir. Borürler oksit olmayan seramiklerdir ve oldukça kırılğan olabilirler. Çeliklerin yüzeyinde oluşan demir-borürlerin sertliği 1600 HV'nin üzerine çıkmaktadır [13]. Şekil 2.5'te borür tabakasının şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.5. Borür tabakalarının şematik gösterimi.

Çeliklerde borlama ısıl işlemi sonucu, yüzeyden difüze olan B atomları olarak iki farklı borür bileşiğinin (FeB ve Fe_2B) oluşumuna neden olurlar. Oluşan bileşik işlem süresi ve malzeme bileşimine bağlıdır. Matrise yakın iç tabaka hacim merkezli tetragonal yapıya sahip Fe_2B , dış tabaka ise ortorombik yapıya sahip FeB bileşiğini içerir. FeB fazı yüzeyde, Fe_2B fazı ise FeB ile matris arasında yer almaktadır [12,28].

Borlanmış bir numunenin borür tabakasının kalınlığı, yapısı (kolonsal veya düz), porozite içerip içermediği metalografik olarak hazırlanması ile tespit edilebilir. Bu tabaka türlerinin görünüşleri, kaplama yapısının özelliklerini hakkında yeterli bilgi içermemektedir [13]. Geçerli olabilecek bir sınıflandırma sistemi kaplama tabakalarının bileşim ve belirleyici görünüşlerine bağlı olarak geliştirilmiştir. Oluşturulan bu sınıflandırma sistemi sayesinde borür tabakasının görünüşünü karakterize etmek ve borlama işleminin uygun olup olmadığına karar vermek mümkün olmaktadır. Sözkonusu sınıflandırma sistemi şekil 2.6'da gösterilmiştir



Şekil 2.6. Borür tabakalarının türleri, a) FeB, b) Fe₂B, c) Geçiş zonu [13].

Görüldüğü gibi 7 farklı borür tabakası elde edilebilmektedir. Bu borür tabakası türlerinden E ve F grubu borürler endüstriyel uygulamalarda tercih edilmekle birlikte bu tip tabakalar her zaman elde edilmeyebilir. Özellikle kalın tabakalarda daha çok D tipi borür tabakası olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek silisyum veya alüminyum ihtiva eden çeliklerde, bu elementlerin kaplama-matris arayüzeyinde birikerek yumuşak ferrit fazı oluşturmaları sebebiyle, borlama işlemi tercih edilmemektedir (Şekil 2.6 G tipi). Borlama işlemi sonucunda elde edilen tek fazlı (Fe₂B) borür tabakasının bazı avantajları şunlardır: Fe₂B fazının, FeB fazına göre daha az kırılğan olması, borlama sonrası ısıl işlemlere uygulanabilirliğe sahip olması ve kaplamanın özellikleridir [29,13]. Oluşan demir-borür fazlarının bazı özellikleri tablo 2.6'da gösterilmiştir [29].

Tablo 2.6. FeB ve Fe₂B fazlarının tipik özellikleri [29].

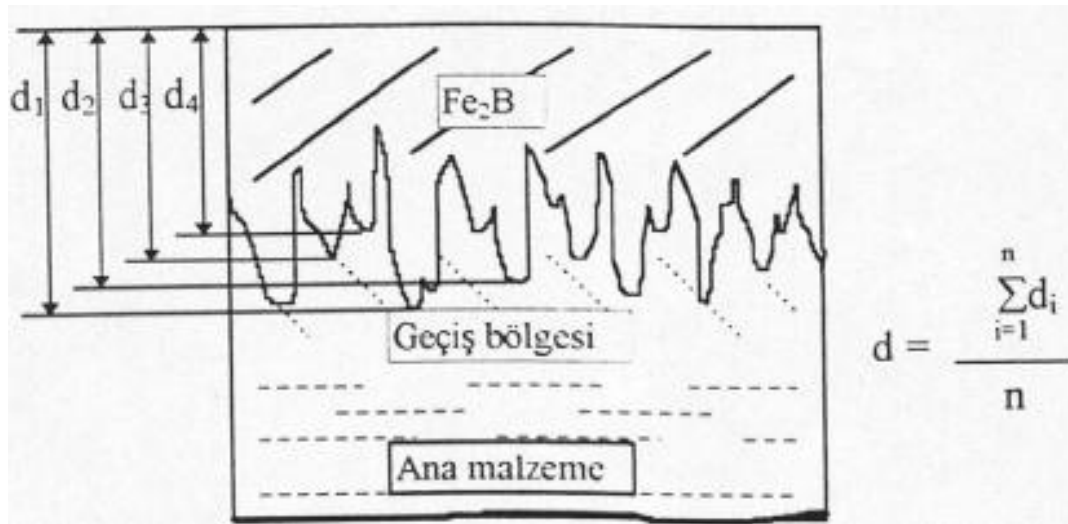
Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli tetragonal	Ortorombik
Latis parametresi	a=5,099, c=4,240	a=4,053, b=5,495, c=2,946
Bor içeriği (% ağırlıkça)	8,83	16,23
Yoğunluk (g/cm ³)	7,43	6,75
Elastisite modülü (GPa)	284	343
Oluşum entalpisi (Kj/mol)	-71,13	-71,13
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Termal genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	7,65	23

Gerçekte FeB ve Fe₂B fazları birbirine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında yüzeye paralel veya dik ilerleyen çatlaklar oluşmaktadır. Fe₂B basma, FeB fazı çekme etkisi yapmaktadır. Bu yüzden FeB ile Fe₂B fazlarının termal genleşme katsayıları arasındaki fark ($\alpha_{FeB}=23$, $\alpha_{Fe_2B}=7.85$) nedeniyle termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalara ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir [3,30,12]. İşlem sıcaklığından soğutma ile farklı kalıntı gerilmeler gelişir ve bu da fazlar arasındaki arayüzeyde yüzeye paralel çatlak oluşumuna neden olabilir. Proses kontrolü (bor konsantrasyonu) ile FeB fazının oluşumu azaltılabilir ya da önlenir [31]. Böylelikle daha sert fakat aynı zamanda daha gevrek olan FeB fazından ve FeB-Fe₂B arayüzeyinde oluşan yüksek gerilimden kaynaklanabilecek komplikasyonlardan kaçınılabilir. Bu yüzden endüstriyel uygulamalarda tek fazlı, özellikle termal genleşme katsayısı çeliğin termal genleşmesiyle uyumlu olan Fe₂B fazı tercih edilmektedir. FeB tabakasından kurtulmak için kullanılan diğer bir yöntem ise çift fazlı Fe₂B+FeB borür tabakasının, vakum veya tuz banyosunda 800 °C sıcaklık civarında uzun süre ısıtılmasına tabi tutulması şeklindedir [13,32].

Çelik bileşiminde bulunan elementler borlama işlemi esnasında yeniden dağılırlar. Bu arada karbon ve silisyum; FeB ve Fe₂B tabakalarının, bu elementleri çözündürme kabiliyeti olmamasından dolayı, borür tabakasından içeriye doğru itilirler. Bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında geçiş bölgesi olarak

adlandırılan bir yapı meydana gelir. Bu bölgede bulunan bor, borür oluşturamayacak miktardadır. Bunun neticesiyle de bu geçiş bölgesinin meydana geldiği bilinmektedir. Geçiş bölgesi, mikroyapı bakımından esas malzeme ve borür tabakasından farklıdır. Bu bölgenin kalınlığı, borür tabakasının kalınlığının 10–15 katı kadardır [33,53].

Borür tabakaları her bir diş uzunluğu farklı testere dişi gibi bir formda olduklarından, tabaka kalınlığının tanımlanmasında güçlükler çıkmakta ve farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle tabakanın diş yapışı, düz bir düzlemlle karşılaştırılarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak (Şekil 2.7) belirtilmektedir [5].



Şekil 2.7. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması (d:Tabaka kalınlığı, n: Bor dişi sayısı) [5].

2.7. Bor Tabakasının Özelliklerine Etki Eden Faktörler

2.7.1. Borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonunun etkisi

Bor kaynaklarının ortamda yeterince bulunması borür tabaka kalınlığını artırır. Ancak ortamda yeterince bor kaynağının olmaması yani borlama işlemi sırasında bor kaynağında bor kalmaması tabaka oluşumunu durdurarak ince bir borür tabakası oluşmasına sebebiyet verir. B₄C den B'nin ayrıştırılması için ortamda redüksiyonu sağlayacak bir madde genellikle SiC (redükthan) bulunmalıdır ki bu sayede iki

maddenin bileşiminden B (elementel bor) elde edilir. Serbest kalan B'nin oksijene olan afinitesi çok yüksektir ve hemen oksijenle B_2O_3 oluşturur. Bunu önlemek için ortamda yeterince SiC bulunmalıdır [3,15].

Redüksiyonu sağlayan SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Böylece FeB ve Fe_2B tabakaları oluşur. Borun demire yayılması KBF_4 ile hızlandırılır.

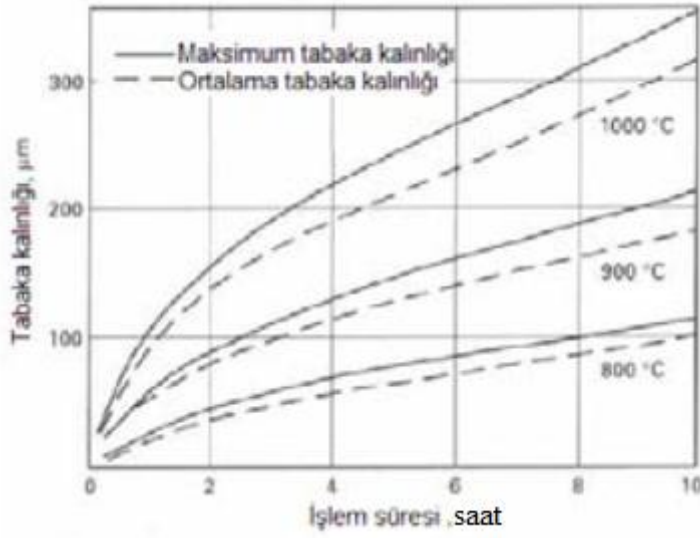
Aktivatör olarak NH_4Cl kullanılarak yapılan bir çalışmada değişik toz karışımlarının, oluşan tabakanın özelliklerine etkileri incelenmiştir. NH_4Cl oranı arttıkça tabaka kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. Ekabor3, NH_4Cl , kromlama tozu ve Al_2O_3 içeren toz karışımında yapılan borlama işlemi ile tabakada bor, krom, silisyum ve alüminyum bileşikler oluşması sağlanabilmektedir: $FeB/Fe_2B \rightarrow Fe_2B \rightarrow \alpha/Fe_2B \rightarrow Fe_2B/(Si,Al)_2(Cr,Fe)$. Bu reaksiyon, karışım içerisindeki NH_4Cl ve Ekabor3/kromlama tozu oranlarının artması ile değişmektedir. 900 °C ve 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda, NH_4Cl oranının artması ile borun difüzyon için gerekli aktivasyon enerjisi azalmaktadır [34].

2.7.2. İşlem sıcaklığı ve zamanının etkisi

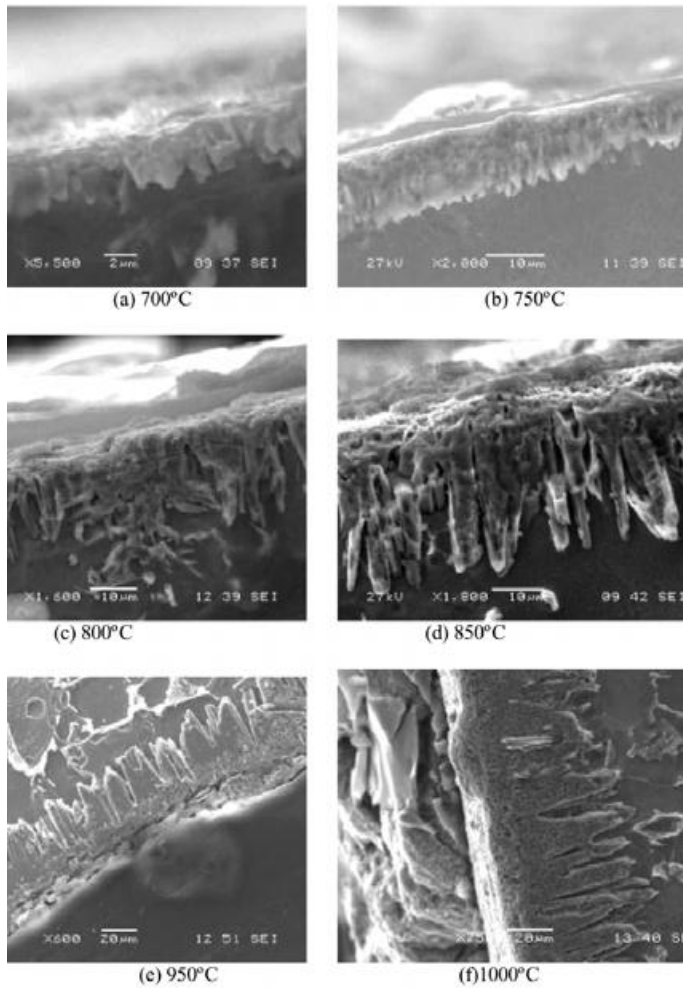
İşlem sıcaklığı ve zamanı arttıkça, elde edilen tabaka kalınlığı da artmaktadır. Şekil 2.8'de C 45 çeliğine uygulanan kutu borlama işleminde sıcaklık ve zamanın etkisi görülmektedir.

Şekil 2.9'da % 0.2 C'lu yumuşak çeliğin 30 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda plazma borlama yöntemiyle borlanması ile oluşan bor tabakaları görülmekte, sıcaklık artışı ile tabaka kalınlıklarının değişimi ise Tablo 2.7'de verilmektedir.

İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1149 °C) altında olması gerekmektedir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda lokal erimeler oluşmakta, bu da malzemenin yüzeyini bozmaktadır. Kalınlık arttıkça, kırılma artmaktadır. Borlama sıcaklığının artması, tabaka kalınlığını arttırması yanında poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrekleşmesine yol açmaktadır [27].



Şekil 2.8. C45 çeliğine uygulanan kutu borlama işleminde sıcaklık ve zamanın etkisi [3].

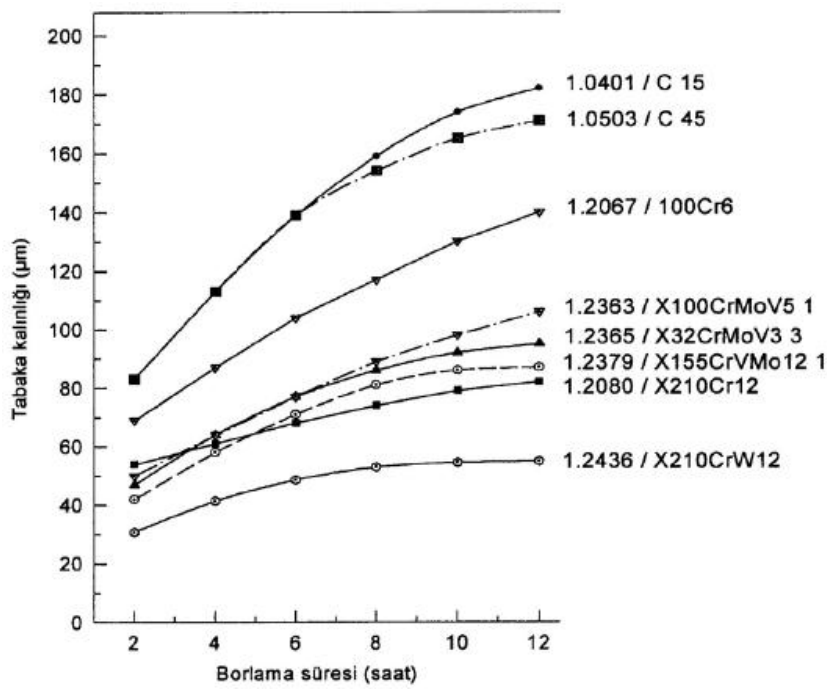


Şekil 2.9. % 0.2 C'lu yumuşak çeliğin 30 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda plazma borlama yöntemiyle borlanması ile oluşan bor tabakası kalınlıklarının karşılaştırılması [51].

Tablo 2.7. % 0.2 C'lu yumuşak çeliğin 30 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda plazma borlama yöntemiyle borlanması ile oluşan bor tabaka kalınlığının zamanla değişimi.

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tabaka kalınlığı (μm)
700	2
750	12
800	17
850	30
950	46
1000	59

Bazı çeliklerde, borür tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi Şekil 2.10'da verilmiştir [13].



Şekil 2.10. Bazı çeliklerde, borür tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi [13].

2.7.3. Alaşım elementlerinin etkisi

Alaşım elementleri kaplama ile matris ara yüzeydeki kristallografik düzeni ve faz bileşenlerini etkilemektedir. Aynı şekilde alaşım elementleri borür tabakasının kalınlığını da etkilemektedir. Alaşım elementleri, altlık malzemedeki ana elementin

bora karşı olan aktivitesine, yani borun yayınmasına ve reaktifliğine tesir ederek, genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde etki etmektedir [35].

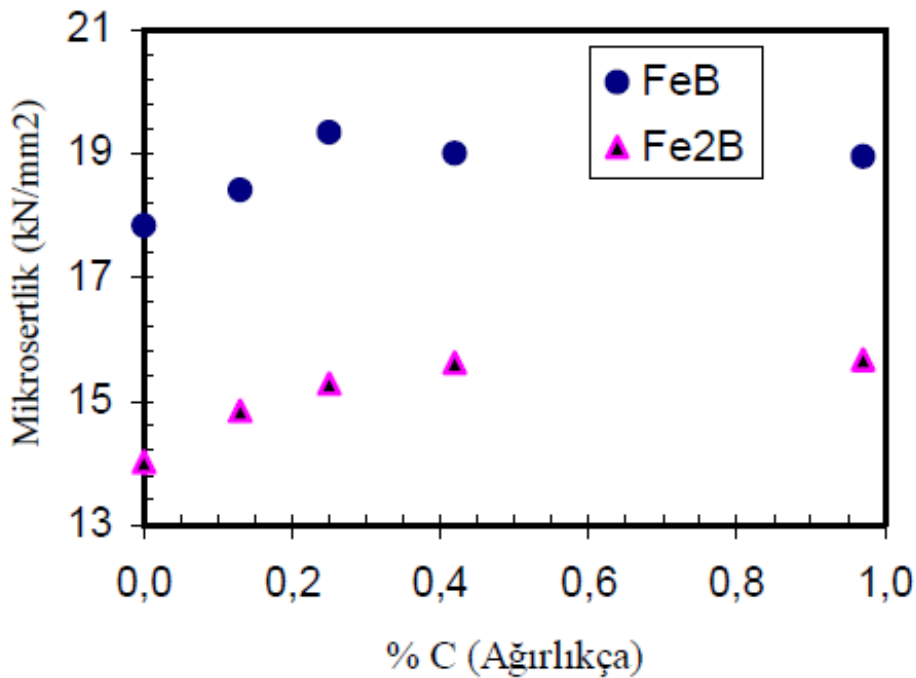
Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda esas olarak $(Fe,M)B$ ve $(Fe,M)_2B$, ($M=Cr,Mn,Ni$) bileşikleri elde edilir. Oluşan bu borürlere alaşım elementlerinin etkileri farklılıklar arz etmektedir. Borür tabakası içindeki alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerde de önemli ölçüde değişiklik görülür. Borlanan malzemede alaşım elementleri, atom numaralarına ve çaplarına bağlı olarak reaktivlik gösterirler [13]. Krom ve manganın atom numaraları demirin atom numarasından düşük olduğundan, ana malzemenin içinden yüzeye doğru yayılırken, nikel ve karbon yüzeyden içeriye doğru yayınırlar. Alaşım elementleri ($Mn, Cr, Mn+Cr$), orijinal malzeme sertliğini artırır. Alaşımli özel çeliklerde bu artış 50 Hv değerinden daha düşüktür. Alaşımli ve alaşımsız çeliklerin borlanması sonucunda ise ortaya çıkan sertlik farkı, borlanmamış haldekiler ile mukayese edilemeyecek kadar büyük olmaktadır [12].

Borlama işleminde kullanılan yöntemden bağımsız olarak, karbon çeliklerinde yüzeyde iki tür borür fazı oluşabilmektedir. Genellikle kolonsal yapıda büyüdüğü görülen borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe_2B fazı ve bu fazın altında geçiş zonu yer almaktadır. FeB fazı ile Fe_2B ve Fe_2B ile matris arayüzeyindeki yapı da kolonsal tarzdadır. Ancak yüksek alaşımli çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabakası ve büyüme mekanizmasına etkisinden dolayı, arayüzey yapısının kolonsal yerine düz ve kompakt olduğu belirtilmektedir [13,29]. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça, kolonsal (dişli) yapı oranı azalmaktadır. Alaşım elementlerinin matris ve borür tabakası içerisindeki çözünürlüklerine bağlı olarak, matrisin yakınında oluşturdukları bileşiklerin borlama mekanizmasını etkilemesinden dolayı borür tabakasının yapısı değişmektedir [13].

Belli başlı elementlerin borür tabakasına etkileri şu şekildedir:

Karbon: Karbonun hem borür tabakasına, hem de tabaka/matris arayüzey morfolojisine etkisi vardır. Borür tabakasında önemli bir çözünürlük seviyesine ulaşamayan karbon atomları, borür tabakası boyunca difüzyona uğramaz ve borlama

süresince yüzeyden matrise doğru sürüklenerek borla birlikte $Fe_3(B,C)$ şeklinde Fe_2B -matris arayüzeyinde yer alır. Az ve orta karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapıya sahip olurken, yüksek karbonlu çeliklerde borür tabakası /matris arayüzeyinin düz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Karbon elementi kaplama tabakası içerisinde çözünmeyip, matrise doğru difüze olmakta ve kaplama tabakasının hemen altındaki geçiş bölgesinde Fe_3C , $Cr_{23}C_6$, Fe_6C_3 , gibi karbürlerin oluşumuna sebep olmaktadır. Çeliklerde borür tabakasında oluşan FeB ve Fe_2B fazlarının sertlikleri karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Bu artış %0.4 C'a kadar devam eder, daha sonra sabit kalır (şekil 2.11) [3,13].



Şekil 2.11. Karbon miktarına bağlı olarak borür tabakasındaki FeB ve Fe_2B fazlarının sertliğinin değişimi [13].

Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka kalınlığında bir azalmanın olduğu ve bu azalmaya, FeB fazının kararlılığının azalmasının neden olduğu belirtilmektedir. Yani çeliklerdeki karbon artışı, FeB fazının kararlılığı azaltırken, Fe_2B fazının kararlılığı arttırır [12].

Krom: Krom da, karbon gibi borür tabakasının hem morfolojisine hem de kalınlığına etki etmektedir. Kromun, atom numarası demirin atom numarasından düşük olduğu için, altlık malzemedan ziyade borür tabakasında, yani $(Fe,Cr)B$ ve $(Fe,Cr)_2B$ 'da

daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayılır. Matristeki krom miktarı arttıkça, borür tabakası/matris arayüzeyinin kolonsal yapısı düz hale gelmektedir. Çelik içerisinde krom miktarının artışına bağlı olarak, Fe_2B fazına nazaran borca daha zengin olan FeB tabakasının kalınlığı artış göstermektedir. Krom içeren borür tabakasının sertliği, krom miktarı ile doğru orantılı olarak artar [23].

Matristeki krom miktarı arttıkça, borür tabakası/matris arayüzeyinin kolonsal yapıdan düz hale gelmesi, alaşım elementinin borür tabakası içerisinde demir atomlarının yerini alması sebebiyledir [13]. Bindal, borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tesbit etmiştir. Ayrıca, kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirtmektedir. Krom, tabaka boyunca hemen hemen homojen bir dağılım gösterir ve kromlu çeliklerde oldukça düzgün bir geçiş bölgesi oluşur [12].

Kromlu alaşımların borlanması borür tabakasının sertlik ve kırılabilirliğinin arttığı, buna karşılık, borür tabaka kalınlığının alaşımsız çeliklere göre belirgin bir değişme göstermediği, ancak krom miktarının artışına bağlı olarak azaldığı belirtilmektedir [12].

Manganez: Manganez, kroma benzer şekilde tercihli olarak borür tabakasına girerek, yüzeye doğru yayılır ve borür tabakasının kalınlığını azaltıcı yönde etki yapar. Dukarevich ve Mozharov, manganın FeB bölgesinde konsantre olduğunu söylerken, Tsipas ve Rus (1987), çözünmenin genellikle Fe_2B 'de olduğunu iddia etmektedirler. Mn, borür tabakasının kalınlığını azaltıcı yönde etki yapar ve artan Mn oranı ile tabaka geometrisi düzgünleşir (Özsoy,1991). Carbucchio vd. (1984), manganlı çeliklerin borlanması sonucunda, mangan borürlere rastlamadığını söylerken, Bindal (1991), yüksek manganlı çeliklerde, borlama süresine bağlı olarak mangan borürler (MnB , Mn_2B) tesbit etmiştir [5,12].

Nikel: Borlanan numunelerde, borlu tabaka /matris ara yüzeyleri artan nikel miktarı ile daha da düzenli olmaktadır. Yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir [15].

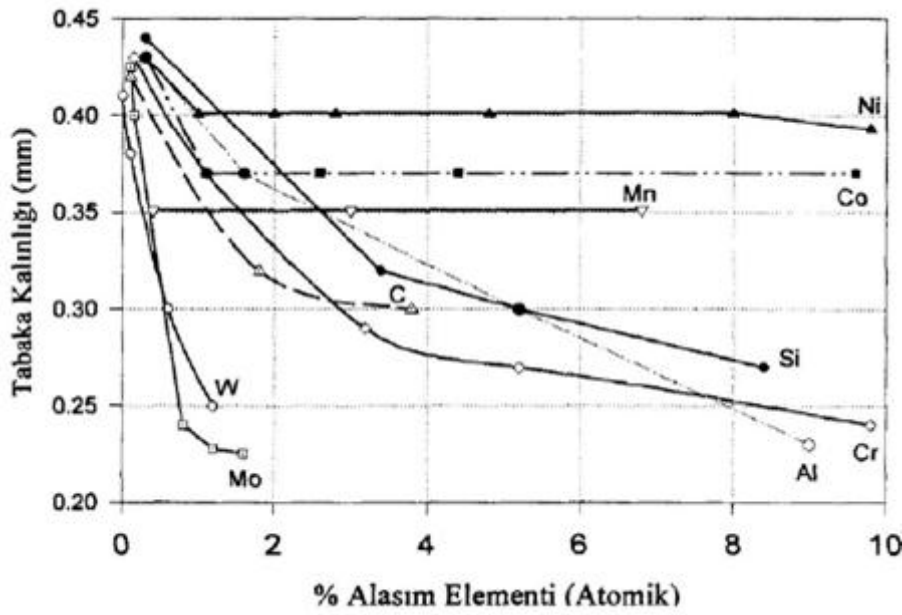
Altlık malzemede ağırlıkça %9'a kadar nikel bulunması tabaka geometrisini olumsuz olarak etkilememekle birlikte miktarı bu değerin üzerine çıkınca, kaplama/matris arayüzeyinde kolonsal yapının düzlemsel yapıya dönüşmesine ve porozitenin artmasına neden olmakta ve kaplamanın mekanik özelliklerini de kötüleştirmektedir [13,12]. Krom tabakanın sertliğini artırırken, nikelin etkisi ihmal edilebilir seviyededir. %4 Ni içeren çeliklerde 90 µm borür tabaka kalınlığı elde edilirken, %14 Ni içeren çeliklerde bu değer 60 µm'e düşmektedir [12].

Nikel miktarının artmasıyla (Fe, M)B fazının en dış tabakasında nispeten yüksek oranda düşme meydana gelmektedir. Bu da iki fazlı bir numunede, atom numarası demirden daha yüksek olan nikelin borca zengin fazdan düşük bor fazına yayındığına dalalet etmektedir [27]. Borür tabakası ile ana malzeme arasında konsantre olan nikel, Fe₂B tabakasının gelişmesine yardımcı olur ve düşük nikelli borürlerin ((Fe,Ni)B ve (Fe,Ni)B₂) oluşmasına yol açar. Nikel tabaka kalınlığını krom kadar etkilemez. Nikel miktarının artışı Fe₂B'nin sertliğini düşürürken, FeB fazını etkilemez [15,29,12].

Silisyum Alüminyum ve diğer elementler: Silisyum ve alüminyum da karbon gibi davranarak, bor tabakası içerisinde çözünmezler. Bor atomları tarafından yüzeyden içeriye doğru itilirler. Yüksek miktarda Si ve Al içeren çelikler borlamaya uygun değildirler. Çünkü bor tabakasının altında yumuşak bir ferrit zonu oluştururlar. Bu da pullanma mukavemetini azaltır [15].

Silisyum, borlama işlemi sırasında çeliğin iç kısımlarına doğru itilerek borür tabakası ile metal arayüzeyinde FeSi_{0,4}B_{0,6} ve Fe₄SiB₂ bileşiklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Borür tabakasının aşınma direncini azaltması sebebiyle ferrit oluşturucu bu elementleri fazla miktarda içeren çelikler, pek kullanılmamaktadır [12].

Vanadyum, kararlı bor bileşikleri yapar (VB ve V₂B₃ gibi). Vanadyum borürleri Ti, Cr ve Zr borürleri gibi yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı gösterir [36]. Şekil 2.12'de bazı alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi görülmektedir.



Şekil 2.12. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi [3].

2.8. Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulamaları

Borlanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle otomotiv, makine, kimya, tekstil ve gıda endüstrileri başta olmak üzere çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle abrezif ve adhezif aşınma şartlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Aşınmanın büyük bir problem teşkil ettiği alanlarda borlama işlemi parçaların kullanım ömrünün artmasını sağlayarak büyük ekonomik katkılar sağlamaktadır [3,12]. Borlama işlemine tabi tutulan malzemelerin başlıca kullanım alanları tablo 2.8'de verilmiştir.

Özellikle adhesiv ve abrasiv aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur:

- DIN St 37 çeliğinden üretilen tel çekme aletleri, ringleri ve kovanlarında,
- Tekstil makinalarında kullanılan dökme demir dramlarda
- Su ayar vanalarının dörtlü kavrama besleyicilerinde (AISI 316 Ti çeliğinden),
- Ateşleme nozulları, girdaplı dönme elemanları ve kimya endüstrisinde petrol yakıtlı makinalarda enjektör başlarında,
- Çeşitli yüksek performanslı tekerlekler ve önemli motorlarda sürme, sonsuz vida ve helisel dişlilerde.

Tablo 2.8. Borlama işlemine tabii tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları [37].

Borlanan Malzeme			Uygulama Alanları
AISI	BSI	DIN	
		St 37	Kovanlar, sürgüler, nozüller, taşıma tüpleri, taban plakaları, besleyiciler,
1020		C15,Ck 15	Dişli sürücüler, pompa şaftları
1043		C45	Pinler, yardımcı kavrayıcılar, aşındırıcı diskler ve sürgüler.
		St 50-1	Döküm akıttıcılar, nozıllar ve kollar.
1138		45S20	Şaft koruma parçaları, mandreller.
1042		Ck45	Girdaplı akış elemanları, nozüller(petro yakıtlar için) merdaneler, sürgüler
		C45W3	Giriş plakaları
W1		C60W1	Kavrama aynası, yardımcı baralar
D3		X210Cr12	Kovan, basma aletleri, plaka, mandreller, çekiçler, kalıplar.
C2		115CrV3	Çekme kalıpları, enjektörler, yataklar, giriş pinleri
		40CrMnMo7	Giriş plakaları, bükme kalıpları
H11	BH11	X38CrMoV51	Vanalar, injeksiyon silindirleri, çıkıcılar
H13		X40CrMoV51	Ağızlar, ingot kalıpları, sıcak dövme için alt ve üst kalıplar ve matrisler,
H10		X32CrMoV33	İnjeksiyon kalıplama kalıpları, besleyiciler, sıcak şekillendirme için alt ve üst kalıplar ve matrisler.
D2		X155CrVMo121	Çekme kalıpları, soğuk haddeleme merdaneleri.
		105WCr6	Kalibreli merdaneler
D6		X210CrW12	Sıkıştırma merdaneleri
S1	-BS1	60WCrv7	Basma ve çekme matrisleri, mandrelleri, doğrultucuları, kalıpları
D2		X165CrVMo121	Çekme kalıpları, soğuk haddeleme merdaneleri.
L6	BS224	56NiCrMo4	Ekstrüzyon kalıpları, kovanları, döküm ileticiler, dövme kalıpları ve
		X45NiCrMo4	Kalibreli kalıplar, basınç pedleri ve kalıpları.
O2	-BO2	90MnCrV8	Kalıplar, bükme kalıpları, basınç takımları, kalibreli merdaneler, kovanlar,
E52100		100Cr6	Toplar, merdanelere, yardımcı baralar ve yardımcı elemanlar.
		Ni36	Demir dışı metallerin döküldüğü döküm parçaları.
		X50CrMnNiV229	Magnetize edilemeyen takımların parçaları (ısıl işlem yapılabilir.).

Tablo 2.8. Borlama işlemine tabii tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları (devamı).

Borlanan Malzeme			Uygulama Alanları
AISI	BSI	DIN	
4150	-708A42	50CrMo4	Taban plakalarının nozülleri.
4317		17CrNiMo4	Konik, vida ve silindir dişliler; şaftlar, zincir bileşenleri
5115		16MnCr5	Helisel yatak tekerlekleri, yardımcı baralar, yatak kolonları.
6152		50CrV4	Güvenlik plakaları, sürücü parçalar, valf yayları, yay yuvaları.
302	302S25	X12CrNi188	Vida yuvaları ve kovanlar.
316	-316S16	X5CrNiMo1810	Plastik ve kauçuk endüstrisinde kullanılan delinmiş veya küçük holler
		G-X10CrNiMo188	Valf açıcıları, tekstil ve kimyasal endüstri için parçalar.
410	410S21	X10Cr13	Valf bileşenleri ve besleyiciler.
420	420S45	X40Cr13	Valf besleyicileri, dalıcı rotlar, besleyiciler, yardımcı ekipmanlar, kimyasal
		X35CrMo17	Saftlar, valfler, dingiller.
DDL ve DDK			Tekstil makinaları için parçalar, mandreller kalıplar, kollar.

Abrasiv aşınmaya dirençli malzemeler olarak, makaralar, valf elemanları, vidalı sürücüler ve kovanlar, delinmiş veya dar ve küçük açılmış faturalar, şaftlar, tamamlayıcılar, paslanmaz çelik malzemelerden üretilebilmekte ve ayrıca helikopter turbin kanatçıkları borlanmış Ti-6Al-4V malzemeden üretilmektedir.

Borlanan parçalar, basınçlı döküm kalıpları, blok bükücüler, blok sürücüler, boru klipsleri, presleme şekillendirme sürücüleri, çeşitli tipte basınçlı soğuk şekillendirme kafaları, bükme, ekstrüsiyon, damgalama, presleme, dövme, çekme ve germe kafalarında kullanılmaktadır (A2, A6, D2, D6, H10, H11, O2 ve diğer takım çelikleri).

Aynı şekilde bu parçalar, Al, Zn ve Sn alaşımları gibi metallerin sıvı eriyiklerinin taşınmasında da kullanılmaktadır (DIN St 37). Korozyon dirençli taşıma boru sistemleri, örneğin vinil klorür monomerleri, öğütme diskleri (Ck 45) ve basınçlı döküm sistemleri, hava akımlı erozif aşınma gömlekleri, veri yazıcı elemanları (manyetik başlar, tel yazıcılar) bunlara örnek olarak verilebilir.

Borlanmış permalaşım lar manyetik kafalarda kullanılmaktadır. Borlanmış sementit karbürler, tel çekme kalıplarında, yardımcı parçalarda, ve boyutsal ölçüm parçalarında kullanılmaktadır. Çok bileşenli borlamaların kullanım alanlarına örnek olarak, bor-kromlama işleminin ostenitik paslanmaz çeliklerin, bor-krom-titanyumlama ise plastik makinalarının parçalarında aşınma direncini arttırması söylenebilir [38].

BÖLÜM 3. BORLANMIŞ YÜKSEK ALAŞIMLI ÇELİĞİN MODELLENMESİ

Bu bölümde sonlu elemanlar metodunun temelleri ve borlanmış yüksek alaşımlı çelikteki kalıntı gerilmeleri tespit etmek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modelinin tasarım aşamaları anlatılacaktır.

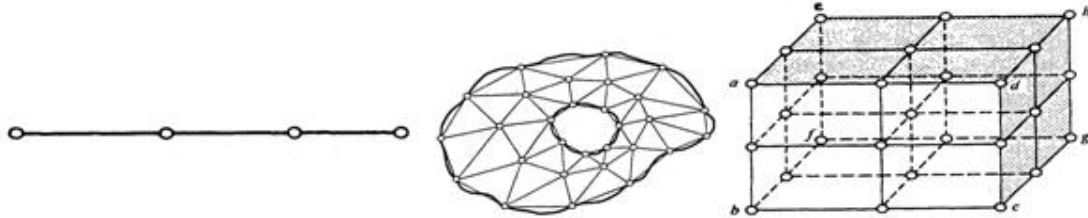
3.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Bilim adamları ve mühendisler alışılmış analitik metotlarla çözümü çok zor hatta imkânsız fiziksel problemlerle sık sık karşılaşır. Örneğin bir dış kuvvet takımı etkisinde üç boyutlu bir elastik cisim düşünelim. Bu kuvvetlere cismin kesin tepkisini hesaplamak için deformasyonlar cinsinden yazılmış denklemlerin bir kapalı form çözümünü aramak zorundayız. Bununla birlikte genellikle kompleks geometrik şekilli uygulama problemlerinin böyle bir çözümünü elde etmek aşırı ölçüde zor ve çoğunlukla imkansızdır. Bu tip problemler mühendislik ve diğer bilim dallarında çok sık ortaya çıkmaktadır. Böyle bir problemle karşılaşan çözümleyici doğal olarak sayısal yöntemler adı verilen çözüme başvuracaktır. Başka metotlarla çözülemeyen problemlerin çözümünde kullanılabilen çok sayıda sayısal yol vardır. Sonlu elemanlar metodu bunlardan biridir. Sonlu elemanlar metodu yeni bir çözüm yöntemi olup kendisini diğerlerine üstün kılan seçkin özelliklere sahiptir. (Nath 1974)

Bu metotta cismin sonlu sayıda elemana ayrıldığı düşünülür. Metodun adı da buradan gelmektedir. Cisim uzayda n (1, 2, 3) boyuta sahipe, n -boyutlu sonlu elemanlar sistemine ayrılır [40].

Bir boyutlu cisimler düğümlerle, iki boyutlu cisimler çizgilerle, üç boyutlu cisimler düzlemlerle sonlu elemanlara ayrılır. Bir boyutlu cisimlerde sonlu elemanlar farklı uzunlukta olabilirler. Ancak iki veya üç boyutlularda elemanlar, eşit olmayan boyutlarda olabileceği gibi farklı şekillerde de olabilirler. Bununla birlikte, bütün durum-

larda cismi temsil eden sonlu elemanlar düğümlerle bağlanacaktır. Sonuçta cisim, sonlu elemanlar ve onları birbirine bağlayan düğümlerden oluşan bir sistemle yer değiştirmiş olacaktır. Şekil 3.1’de sonlu elemanlar yönteminde kullanılan düğümler gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sonlu elemanlar yönteminde düğümler [40].

Metodun çözümlemesinde bundan sonraki adım, cismi temsil eden elemanların her birinin eleman direngenlik matrisini tanımlamaktır. Daha sonra eleman direngenlik matrisleri, parçalara ayrılmış cismin tamamına ait tümel direngenlik matrisini oluşturmak üzere toplanır. Bu toplamada, cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve yer değiştirmelerinin sürekliliği sağlanır. Buradan şu matris denklemine ulaşılır.

$$[K] (\delta) = (P) \quad (3.1)$$

[K], cismin tümel direngenlik matrisini tanımlar. Tümel kuvvet vektörü {P}, bütün düğümlere uygulanan dış kuvvetleri; {δ} ise, bütün düğümlerin yer değiştirmelerini göstermektedir. [] işareti kare (veya dikdörtgen) matrisleri, { } İşareti vektörünü gösterir.

Denklemler 3.1 incelenirse, [K] nitelik bakımından, parçalara ayrılmış cisimde birim yer değiştirme oluşturacak kuvveti ifade eder. Buradan cismin sonlu eleman modelini bir yaya eşdeğer olarak düşünersek cismin direngenliği [K]’nın yay sabitine karşılık olacağı açıktır. Dolayısıyla sonlu eleman metodu, esas itibarıyla, cismin direngenlik açısından analizinin yapıldığı bir metottur [49].

Cisme etkiyen belirli bir dış kuvvetler ve belirli bir sınır şartları takımı için, denklem 3.1' den yegâne çözüm olarak düğüm yer değiştirmeleri $\{\delta\}$ bulunur. Yer değiştirmelerden de, gerilmeler ve zorlanmalar hesaplanabilir.

Verilen bir problemin sonlu eleman metodu ile çözmek için sırası ile aşağıdaki işlemlerin uygulanması gerekir:

- 1- Cismi bir sonlu elemanlar sistemi halinde bölme
- 2- Cismi temsil eden elemanların her birinin eleman direngenlik matrisi ve diğer özelliklerinin çıkarılması.
- 3- Tümel direngenlik matrisi $[K]$ ve tümel kuvvet vektörü $\{P\}$ nin toplama işlemi.
- 4- $\{\delta\}$ yi tayin etmek için, belirlenmiş sınır şartlarıyla denklem 3.1' in çözümü.
- 5- Hesaplanan düğüm yer değiştirmeleri $\{\delta\}$ ' dan elemanların zorlanmalarının ve gerilmelerinin hesaplanması.

Uygulamada bilimsel ve mühendislik problemlerinde, genellikle, büyük $[K]$ matrisleri doğar. Bu yüzden, Denklem 3.1' i çözmek için bilgisayar kullanılması kaçınılmaz hale gelir. Belirtilen işlem adımlarını otomatik hale getirmek için basit programlar yazılabilir. Gerçekten sonlu eleman metodu, otomatik hesaplama ile birleştirilmekle, çözümü çok zor hatta olanaksız karmaşık fiziksel problemleri hassas olarak çözmekte çok etkin ve zarif bir araç oluşturur (Nath 1974).

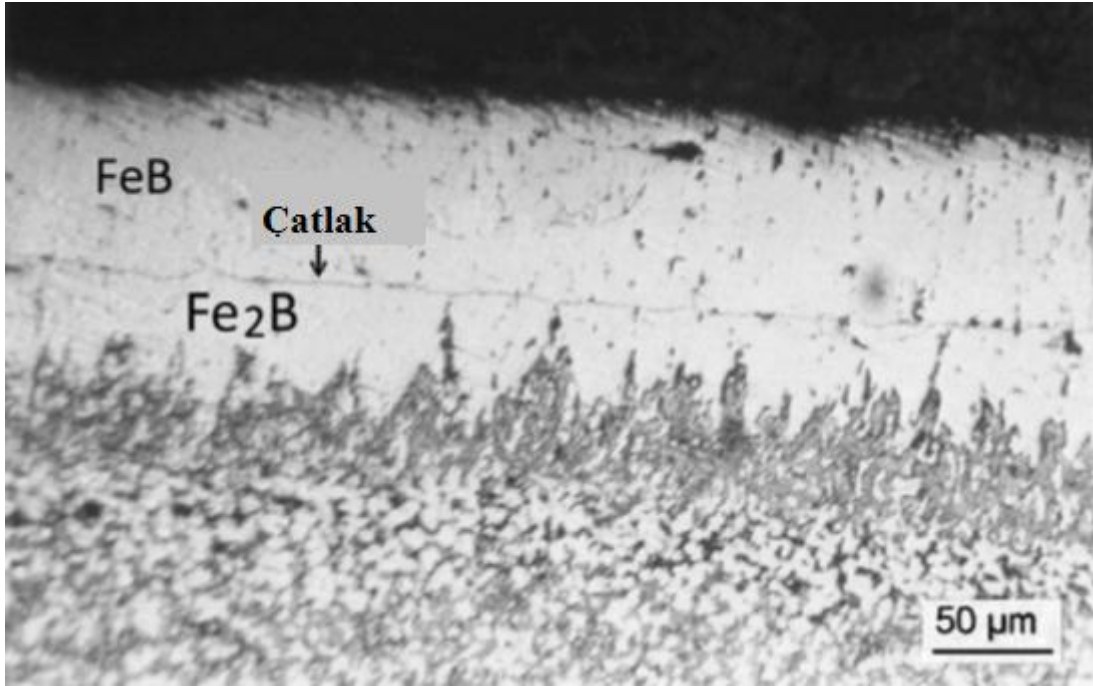
Sonlu elemanlar metodunu diğer sayısal yöntemlerden ayıran özellikleri kısaca özetleyecek olursak:

- Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerin esnekliği nedeni ile verilen bir cismi eksiksiz temsil edebilir, çok bağlantılı bölgeler veya köşeleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.

- Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometrik ve malzeme non-lineeriteleri, kalıtsal olsa bile malzeme özellikleri kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- Sebep sonuç bağıntılarına ait problemler tümel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler veya yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu eleman metodunun bu özelliği problemin anlaşılabilmesini ve çözülebilmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- Sınır şartları kolayca uygulanır.
- Sonlu elemanlar metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplayabilmek için çok etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Analitik ve deneysel incelemelerde daha hassas sonuçlar verir [40].

3.2. Borlanmış Yüksek Alaşımli Çeliğin Modellenmesi

Bilindiği gibi borlanan çeliklerde iki farklı borür tabakası oluşmaktadır. Üst tabaka borca zengin olan FeB ve onun altında oluşan tabaka Fe₂B tabakasıdır. FeB tabakası borca zengin olması hasebiyle daha serttir. Fakat bu tabakada borlama neticesinde artık çekme gerilmelerinin oluşması ve tabakanın kırılgan bir yapıya sahip olması, özellikle mekanik yükler altında çalışan parçalarda sorunlara neden olmaktadır. Bununla birlikte iki borür tabakası arasında çekme-basma gerilmeleri nedeniyle çatlaklar oluşmakta ve korozyon direnci sertlik gibi özellikleri bünyesinde barındıran borür katmanı yüzeyden tabaka tabaka dökülmektedir (şekil 3.2). 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 [13].



Şekil 3.2. FeB ve Fe₂B tabakaları arasındaki çatlak oluşumu [44].

Borlama yapılacak iş parçaları yüksek sıcaklıklarda (800-1200 °C) yüzeye bor atomları yayındırıldıktan sonra oda sıcaklığına soğutulmaktadır. Borlama işlemine tabi tutulan çelik malzeme ile yüzeyde oluşan tek katmanlı Fe₂B bor tabakası arasında ısıl genleşme katsayısı farkından dolayı ısıl gerilmeler oluşmaktadır. Söz konusu fazın ısıl genleşme katsayısının çeliğe göre küçük olması nedeniyle soğuma sırasında çelik malzemeye uyumlu bir biçimde şekil değişimi gösterememekte bu durum hem faz tabakası, hem altlık (çelik) tabakada artık gerilmelerin oluşumuna yol açmaktadır.

Bu gerilmelerin çelik tabakada ve borür tabakasında ne şekilde olduğu ve tabaka kalınlığına bağlı olarak değişimini modellemek amacıyla literatür taraması yapılmış ve Ansys 14.0 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

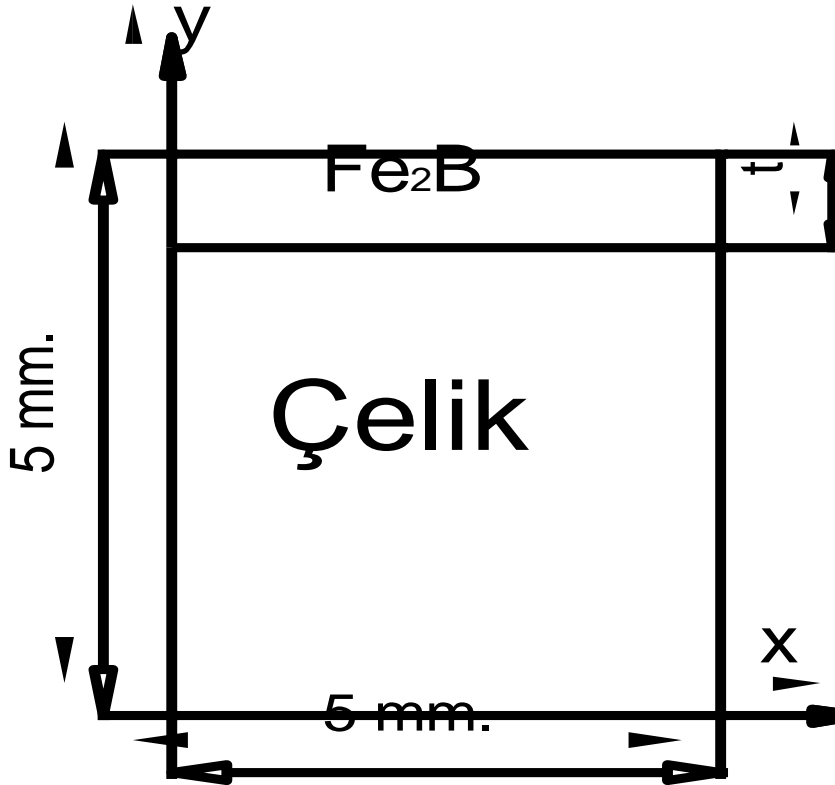
3.2.1. Modelleme

Yüksek alaşımlı çeliklerin borlanmasına ait deneylerde kullanılan deney numuneleri incelendiğinde genellikle dikdörtgenler prizması şeklinde veya ince plaka (bir kenarı

diğerlerine oranla çok ince) şeklinde numunelerin kullanıldığı görülmüştür [41,42,43].

İnce plaka şeklinde bir numuneye ait borlama işlemi 2 boyutlu olacak şekilde modellenebilir. Bu sayede daha basit bir model üzerinden simülasyon yapılabilir. Tüm bu avantajları gözönünde bulundurarak iki boyutlu bir plaka deney numunelerine uygun boyutlarda modellendi. Temelde $10 \times 10 \text{ mm}^2$ boyutlarında olan bu düzlemsel modelin, simetrik sınır koşulları dikkate alınarak, $5 \times 5 \text{ mm}^2$ boyutlarında sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur (şekil 3.3).

Genellikle testere dişi şeklinde olan çelik borür arayüzeyi modelin basitleştirilmesi için düz bir hat şeklinde kabul edilerek modellenmiştir.



Şekil 3.3. Sonlu elemanlar modelinin boyutları.

Borlama işleminde kullanılan yöntemden bağımsız olarak, karbon çeliklerinde yüzeyde iki tür borür fazı oluşabilmektedir. Genellikle kolonsal yapıda büyüdüğü görülen borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve bu

fazın altında geçiş zonu yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris arayüzeyindeki yapı da kolonsal tarzdadır. Ancak yüksek alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabakası ve büyüme mekanizmasına etkisinden dolayı, arayüzey yapısının kolonsal yerine düz ve kompakt olduğu belirtilmektedir [13,29]. Ayrıca FeB tabakası sert ve kırılğan yapıda olması ve çekme gerilmeleri sebebiyle yüzeyden tabaka tabaka borür katmanı kalkmalarına sebep olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edilmemektedir [13]. Tüm bu durumlar gözönünde bulundurularak düz profilli tek katmanlı bor tabakası olarak modelleme yapılmasına karar verilmiştir.

3.2.1.1. Tabaka kalınlığı

Borlama işleminde oluşan borür tabakasının kalınlığı; borlama sıcaklığı, süresi, borlama ortamı ve borlanacak malzeme gibi birçok parametreye bağlıdır. Bununla birlikte borür tabakasının dişli ya da düz görünümde olması borlanan malzeme ve borlama ortamına bağlı olarak değişmektedir. Genellikle testere dişi görünümüne sahip bir profil elde edilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda Yüksek alaşımlı çelik üzerinde oluşan borür tabakasının kalınlığının özel uygulamalarda 250 µm'e kadar çıkabildiği, daha ziyade 20-100 µm kadar bir tabaka elde edildiği görülmüştür [43,44]. Buradan hareketle bu çalışmada t= 20,40,60,80,100 µm tabaka kalınlıklarında simülasyon yapılmasına karar verilmiştir.

3.2.2. Malzeme özelliklerinin girilmesi

Bilindiği gibi malzemelerin özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermektedir. Yüksek alaşımlı çelik çokça kullanılan malzemelerden olup sıcaklığa bağlı olarak malzeme özellikleri bilinmesine (tablo 3.1) rağmen Fe₂B'nin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı değerleri literatürde bulunamamıştır. Bu sebeple Fe₂B için sıcaklıktan bağımsız sabit değerleri kullanılmıştır (tablo 3.2).

Tablo 3.1. Yüksek alaşımlı DIN/ISO 1,2344 çeliğın mekanik ve ısıl özellikleri [45,46].

Yüksek Alaşımlı DIN/ISO 1,2344 Çeliğın Mekanik ve Isıl Özellikleri [45,46]				
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			

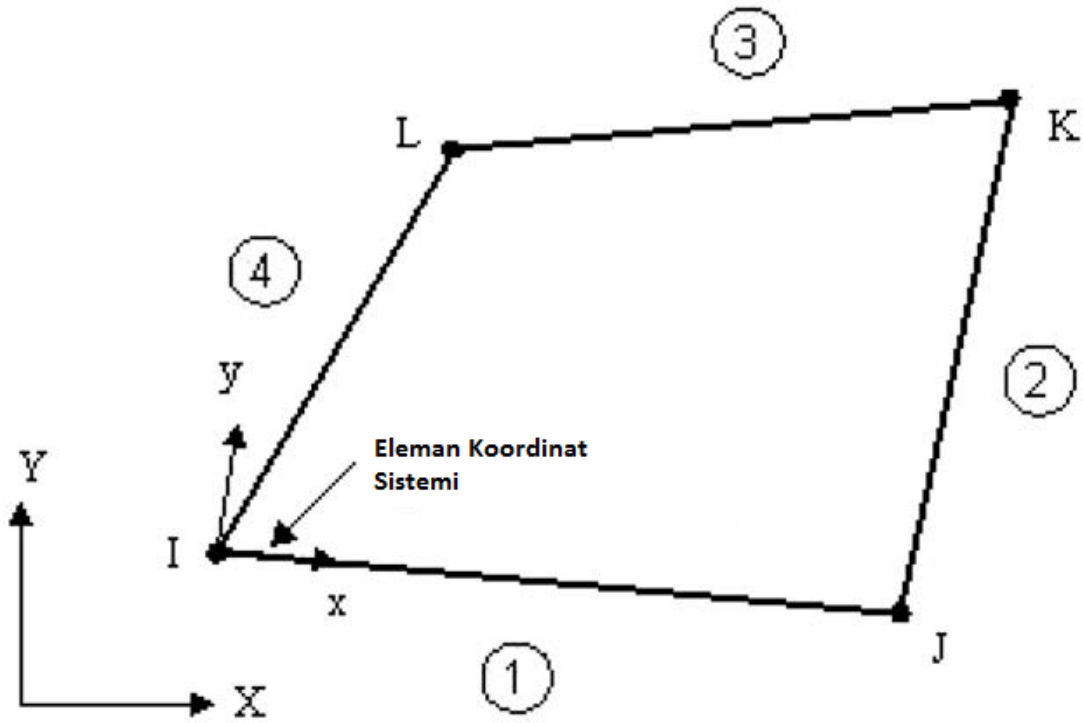
Tablo 3.2. Fe₂B mekanik ve ısıl özellikleri [47,48].

Fe ₂ B Mekanik ve Isıl Özellikleri [47,48]	
Elastisite Modülü (GPa)	285
Isı iletim katsayısı (W/mK)	17,4
Poisson Oranı	0,28
Yoğunluk (Kg/m ³)	6750
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ m/mK)	9,2
Isı Kapasitesi (J/kgK)	650

3.2.3. Eleman tipi ve ağ yapısı (mesh)

Borlanmış çelik malzemenin belli sıcaklıktan oda sıcaklığına soğuması simüle edilerek kalıntı ısıl gerilmelerin bulunması amaçlanmaktadır. Bu sebeple aynı anda hem ısıl hem gerilme analizi yapabilen bir eleman tipinin seçilmesi yerinde olacaktır. Seçilen eleman tipinin zamana bağlı (transient) analiz yapabilmesi de gerilmelerin zamana bağlı değişimini izlemekte yardımcı olacaktır. Ansys yazılımında bu koşullara en uygun eleman tipi Plane 13 'tür (şekil3.4).

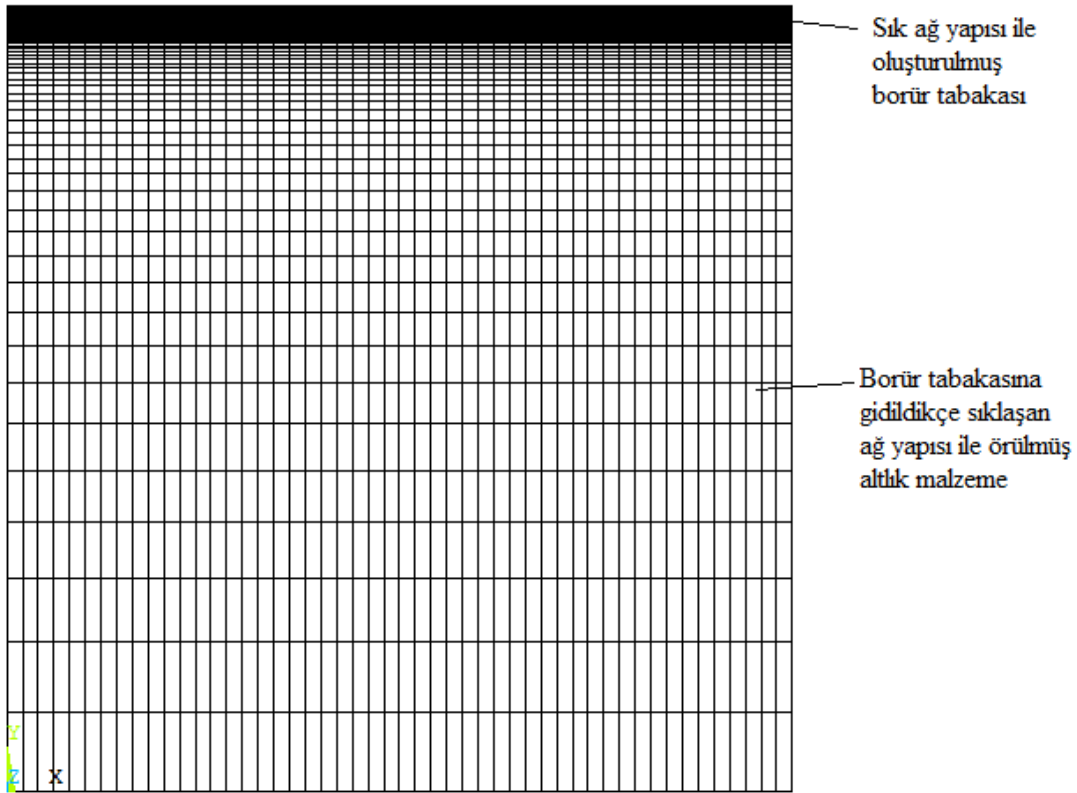
Plane 13 eleman tipi 4 noktalı dört serbestlik dereceli bir eleman tipidir. Yüzey gerilmeli, zamana bağlı (transient) analiz yapabilen, couple field yani hem ısıl hem gerilme analizi yapmaya müsait bir eleman tipidir.



Şekil 3.4. Plane 13 eleman tipi.

Sonlu elemanlar metodunun temelinde oluşturulan modeli küçük parçalara ayırıp herbir parça üzerinden hesap yapılması ve sınır şartlarıyla kapalı bir denklem zinciri oluşturup sonuçların bulunması mantığı yatmaktadır. Genel olarak model ne kadar küçük parçalara bölünürse, metodun o derece doğru sonuç vereceği söylenebilir. Fakat modeli küçük parçalara böldükçe toplam eleman sayısı artmakta bu da işlem süresini uzatmaktadır. Bu sebeple optimum eleman sayısını belirlemek önem arz etmektedir. Ağ yapısı oluşturulurken bu durum göz önünde bulundurulmuştur.

Kaplamaların doğasında var olan durum, artık gerilmelerin kaplama ve civarında yoğunlaşmasıdır. Birçok çalışmada bu durumdan söz edilmektedir. Bu sebeple kaplama ve civarındaki gerilmeler bu çalışmanın da temel konusu olacaktır. Buradan hareketle ağ modeli oluşturulurken kaplama ve civarında küçük boyutlu elemanlar kullanılmıştır. Böylelikle daha hassas sonuçlar alınması amaçlanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için şöyle bir yol izlenmiştir.

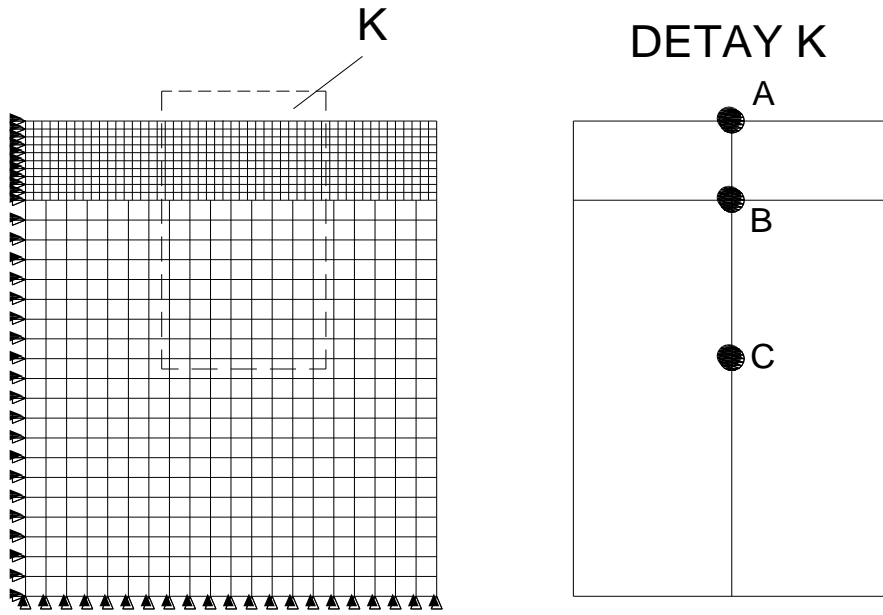


Şekil 3.5. Model ağ yapısı.

Ansyes yazılımında rectangle komutu kullanılarak üst üste iki alan oluşturulmuştur. Üstteki alan kaplama tabakası alttaki alan ise çelik malzemeyi temsil etmektedir ve boyutları şekil 3.3'teki gibidir. Oluşturulan alanlar 'glue' komutu ile birbirine yapıştırılmış, bu sayede ortak hareket etmeleri sağlanmıştır. Kaplama ile çelik malzeme sınırı esas alınarak altlık malzeme bu sınıra yaklaştıkça eleman boyutu küçülecek biçimde düzgün yüzey bölmeli (mapped mesh) ağ yapısı çelik malzeme için oluşturulmuştur. Borür tabakasında ise hem altlık tabakaya nazaran çok ince olması hem de inceleme bölgesi olması sebebiyle oldukça küçük boyutlu elemanlar içeren bir ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 3.5). Böylelikle çok fazla eleman kullanmaktan kaçınılarak işlem süresi kısaltılmıştır.

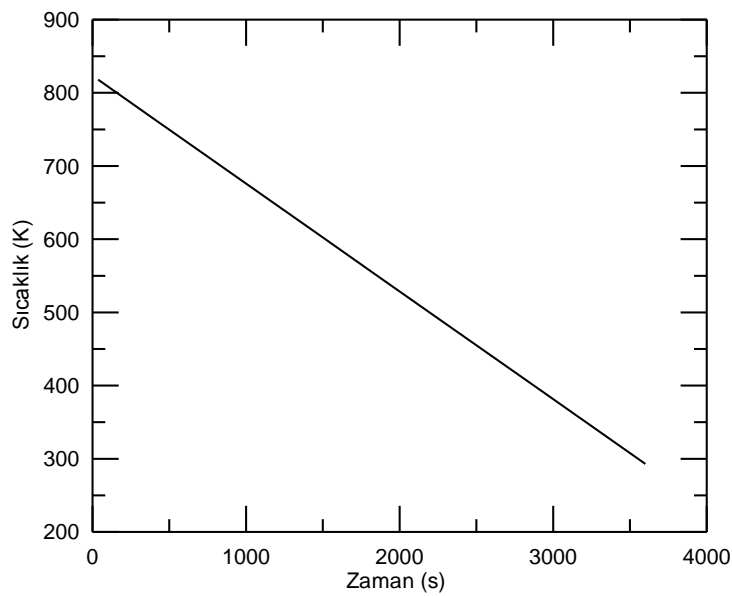
3.2.4. Sınır şartları ve yüklerin girilmesi

10x10 mm² olan parçamızı çeyrek model olarak 5x5 mm² boyutlarında tasarlanmıştır. Parçanın sağ ve üst kenar çizgisine simetri sınır koşulu girilmiştir (şekil 3.6).



Şekil 3.6. Sonlu elemanlar modeli.

Belirli bölgelerdeki değişimi izlemek amacıyla, sonlu elemanlar modelinde, borür tabakası üst yüzeyinde A noktası, borür tabakası ile çelik arayüzeyinde B noktası ve çelik malzeme iç kısımlarına uzanan bölgede C noktası tanımlanmıştır (şekil 3.6). Bu sayede bu noktalardaki gerilmelerin zamanla değişimi ve tabaka kalınlığına göre değişimi kıyas edilebilecektir.



Şekil 3.7. Model üst yüzeyine uygulanan sıcaklık zaman prosesi.

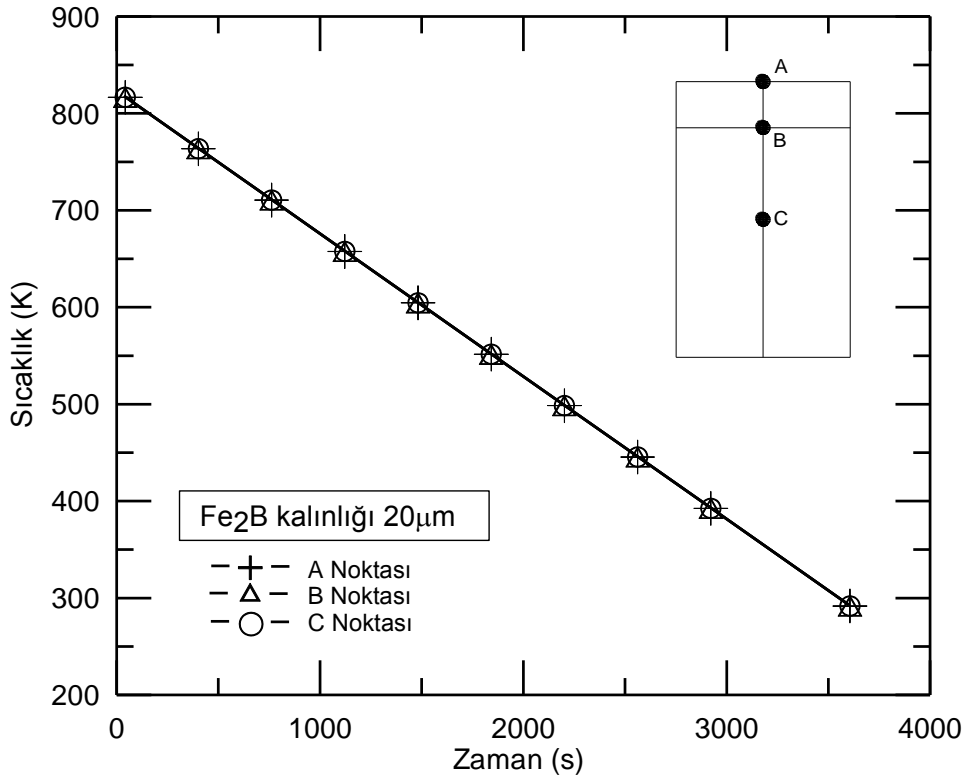
Borlama işleminde parça borlandıktan sonra dış ortama alınarak soğutma işlemi yapılmaktadır. Bu işlemi simüle etmek amacıyla parça üst yüzey sıcaklığının 1 saat (3600 sn.) içerisinde 823 K'den oda sıcaklığına (293 K) lineer olarak düştüğü varsayılmıştır.

BÖLÜM 4. SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI

Bölüm 3'te detaylı bir şekilde açıklanan model üzerinden Ansys programı kullanılarak analizler yürütülmüştür. Bu bölümde sözkonusu tabaka kalınlıkları için (20, 40, 60, 80 ve 100 μm) analizlerden elde edilen sonuçlar açıklanacaktır.

4.1. Tabaka Kalınlığı 20 μm İçin Analiz Sonuçları

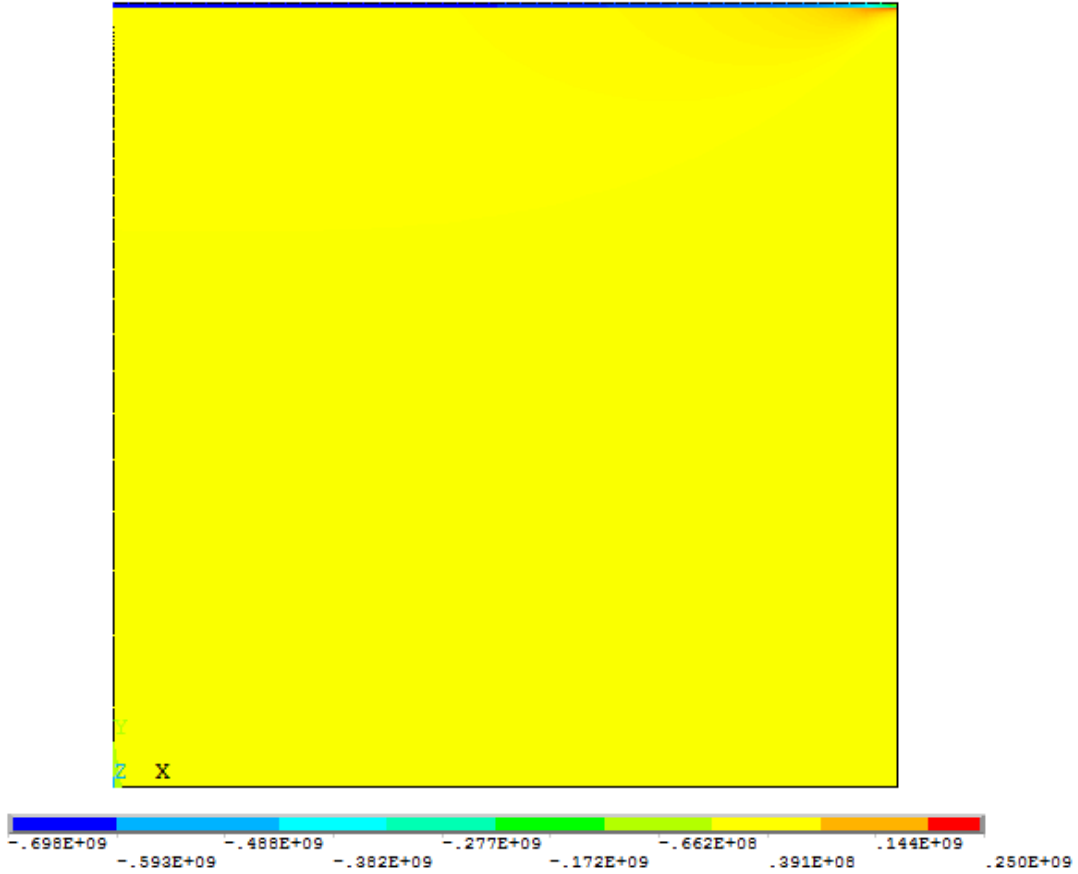
20 μm 'lik borür tabakasına sahip model 3111 nokta ve 3000 elemana bölünmek suretiyle ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha önce model üzerinde belirlenen A, B, C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (Tabaka Kalınlığı 20 μm).

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi parça boyutlarının küçük olması nedeniyle parça içersinde belirgin bir sıcaklık farkı görülmemiştir.

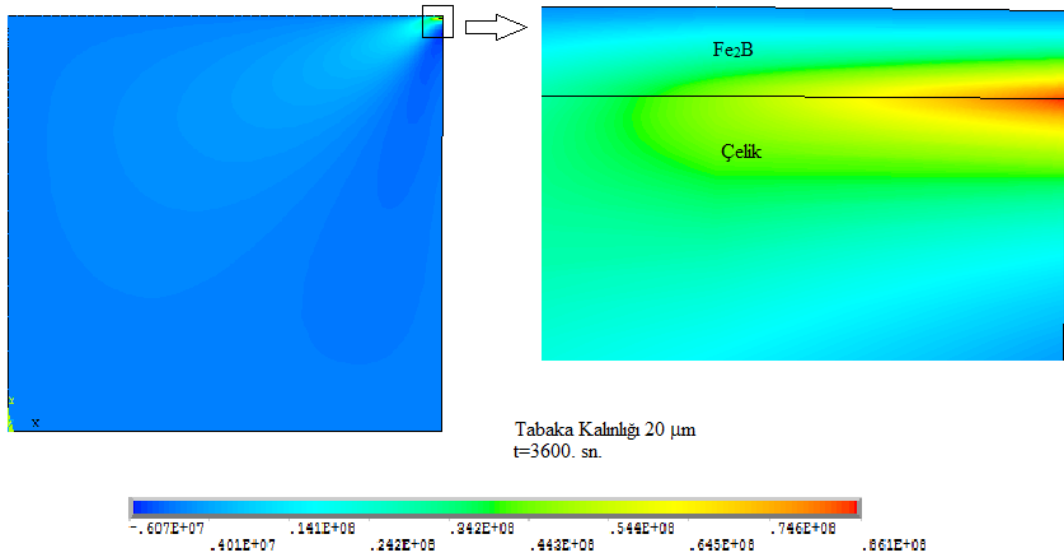
Soğutma işlemi sonunda x yönündeki kalıntı ısıl gerilme dağılımı ise şekil 4.2 de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.2. x yönündeki gerilme dağılımı σ_x (tabaka kalınlığı 20 μm , $t=3600$ sn.).

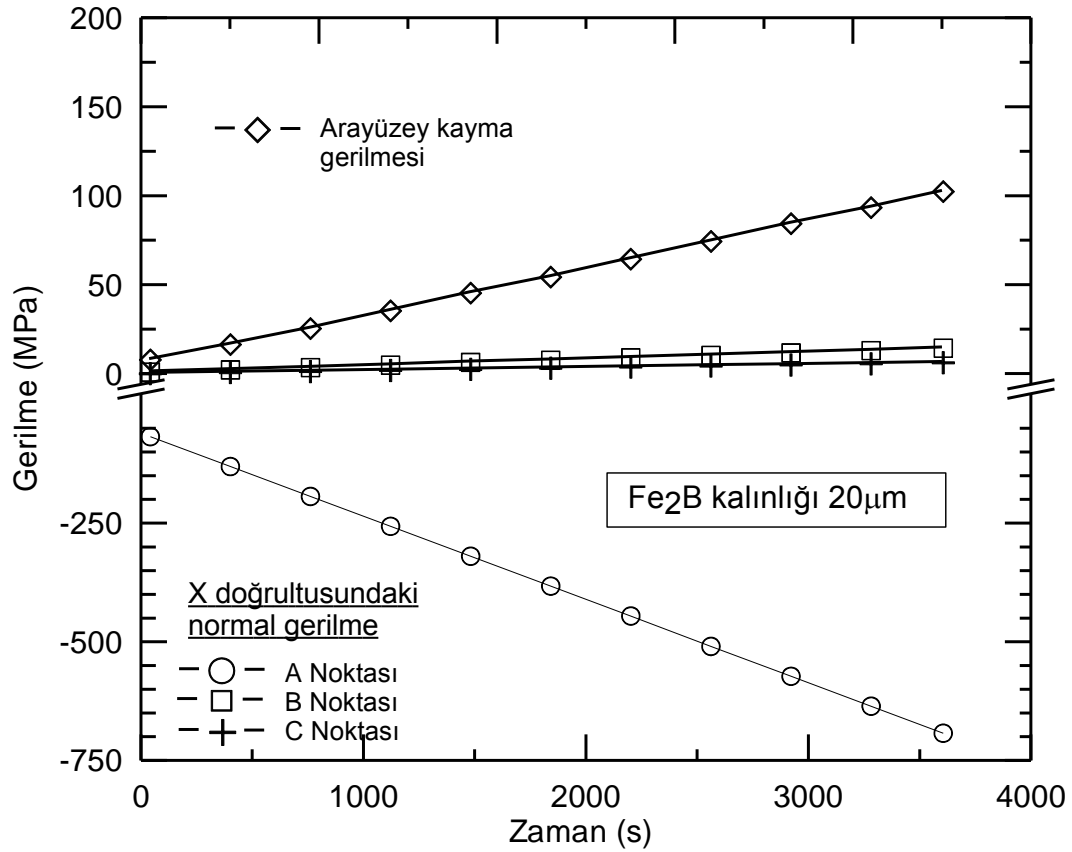
Soğutma işlemi sonucunda borür tabakasında basma gerilmesi, çelik tabakada ise çekme gerilmesi oluşmaktadır. Çekme gerilmesinin değeri daha küçüktür ve borür tabakasının hemen altındaki bölgede en yüksektir.

Kayma gerilmesinin xy düzleminde dağılımı şekil 4.3’te görülmektedir. Kayma gerilmesi aratabaka ile serbest ucun birleştiği noktada 109 MPa değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.3. Kayma gerilmesi dağılımı xy düzlemi (tabaka kalınlığı 20 μm , t=3600. sn.).

A, B, C noktaları için x yönündeki normal gerilmenin ve şekil 4.3 te görülen kayma gerilmesinin en yüksek olduğu uç noktadaki kayma gerilmesinin zamanla değişimini gösteren grafik şekil 4.4'te görülmektedir.

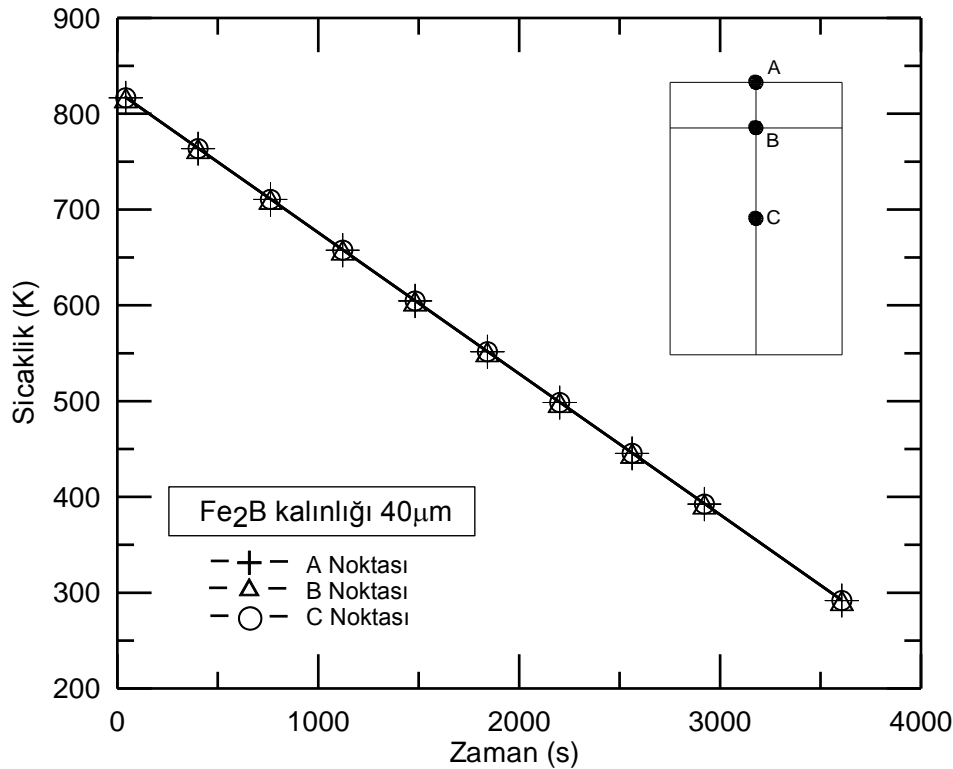


Şekil 4.4. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 20 μm).

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi tüm gerilmelerin değeri soğumaya bağlı olarak zamanla artmaktadır. A noktasındaki gerilme değeri basma türünde olup 65 MPa değerinden 690 MPa değerine yükselmektedir. B ve C noktalarında gerilme değerleri çekme türünde ve A noktasındakine nazaran oldukça düşüktür. B noktasında 1,5 Mpa dan 15 Mpa değerine, C noktasında ise 0,6 MPa'dan 6,8 MPa değerine yükselmektedir. Benzer şekilde şekil 4.3'te gösterilen kayma gerilmesi de 8,4 MPa değerinden 109 MPa değerine yükselmektedir.

4.2. Tabaka Kalınlığı 40 μm İçin Analiz Sonuçları

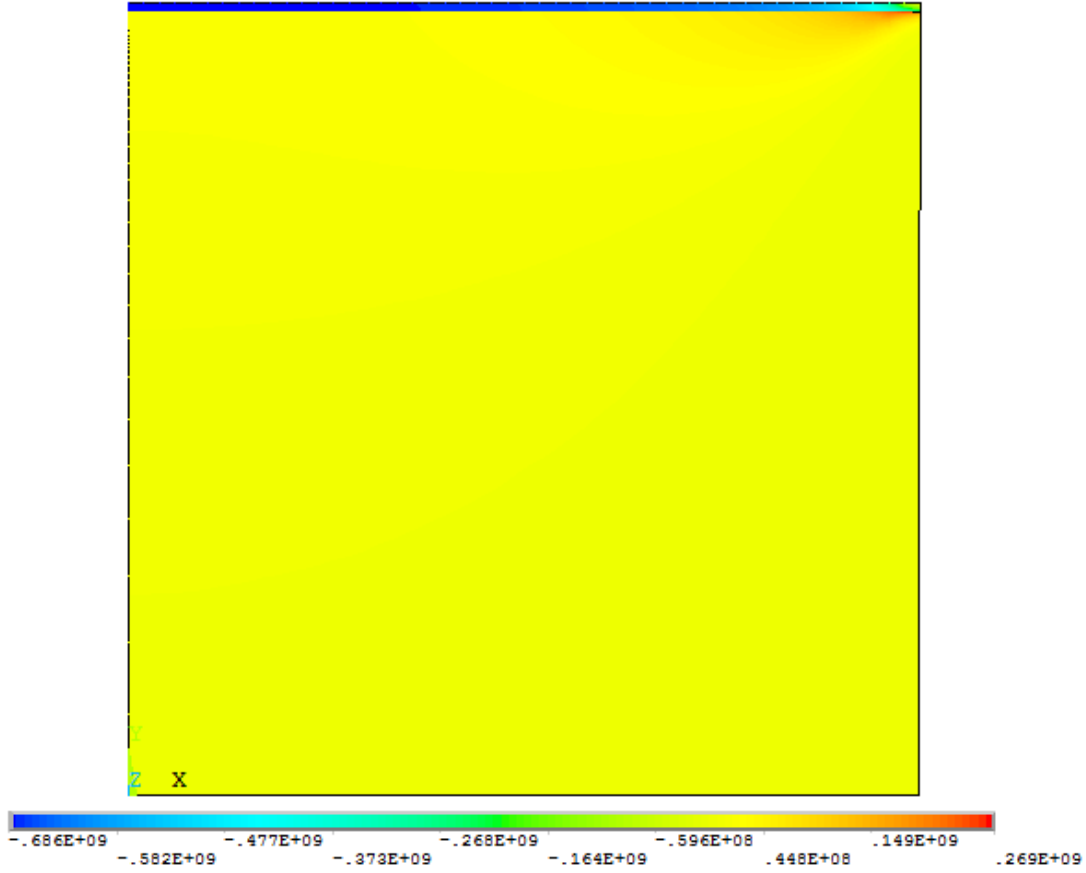
40 μm 'lik borür tabakasına sahip model 3621 nokta ve 3500 elemana bölünmek suretiyle ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha önce model üzerinde belirlenen A, B, C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 40 μm).

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi parça boyutlarının küçük olması nedeniyle parça içerisinde belirgin bir sıcaklık farkı görülmemiştir.

Soğutma işlemi sonunda x yönündeki artık ısı gerilme dağılımı ise şekil 4.6'da görüldüğü gibidir.

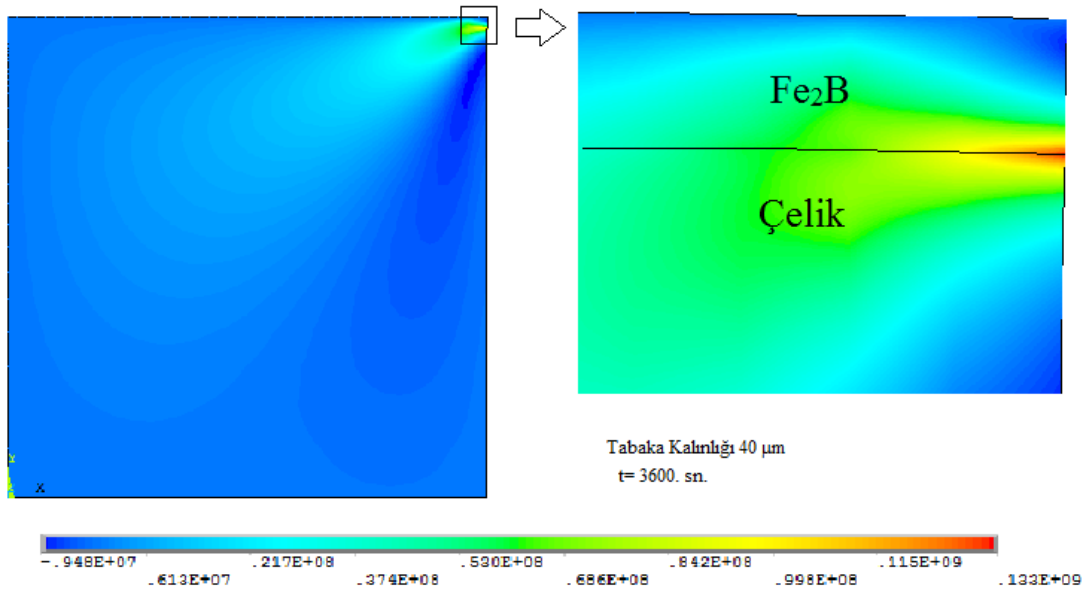


Şekil 4.6. x yönündeki gerilme dağılımı σ_x (tabaka kalınlığı 40 μm , $t=3600$. sn.).

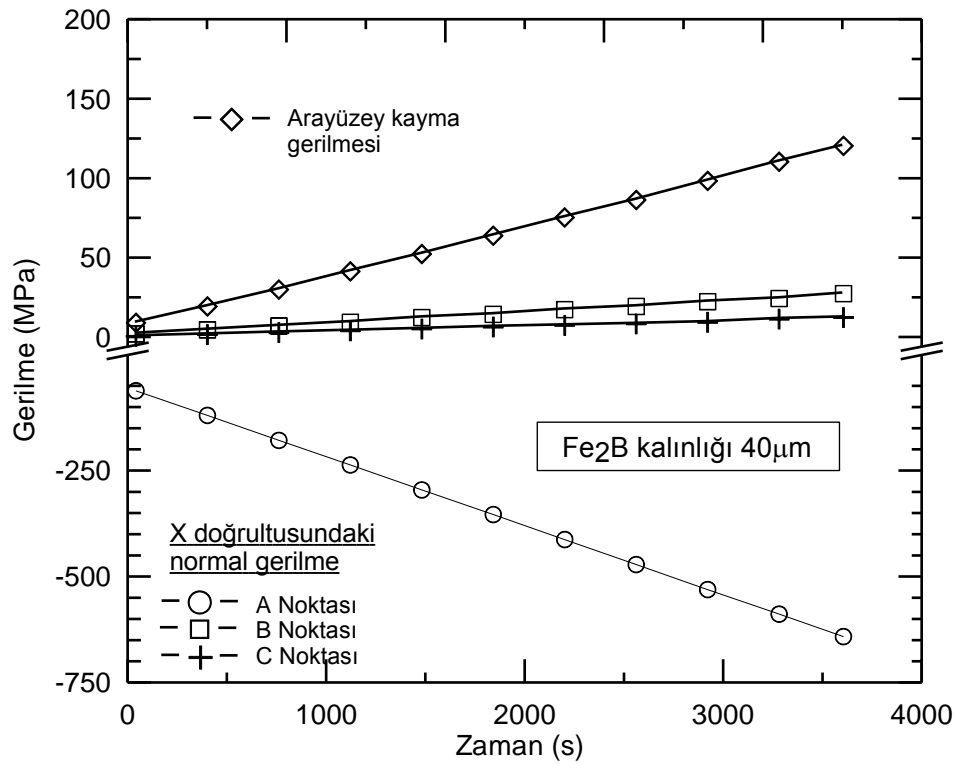
Şekil 4.6'da görüldüğü gibi soğutma işlemi sonucunda borür tabakasında basma gerilmesi, çelik tabakada ise çekme gerilmesi oluşmaktadır. Çekme gerilmesinin değeri daha küçüktür ve borür tabakasının hemen altındaki bölgede en yüksek değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.7'de soğuma sonrası xy düzleminde kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Gerilmenin 20 μm 'dekine benzer şekilde uç kısma gittikçe arttığı ve uç kısımla ara tabakanın kesiştiği noktada 133 MPa değerine ulaştığı görülmektedir.

40 μm tabaka kalınlığı için A, B, C noktalarında x yönündeki normal gerilmenin ve şekil 4.7'de görülen kayma gerilmesinin en yüksek olduğu uç noktadaki kayma gerilmesinin, zamanla değişimini gösteren grafik şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.7. Kayma gerilmesi dağılımı xy düzlemi (tabaka kalınlığı 40 µm, t=3600. sn.).



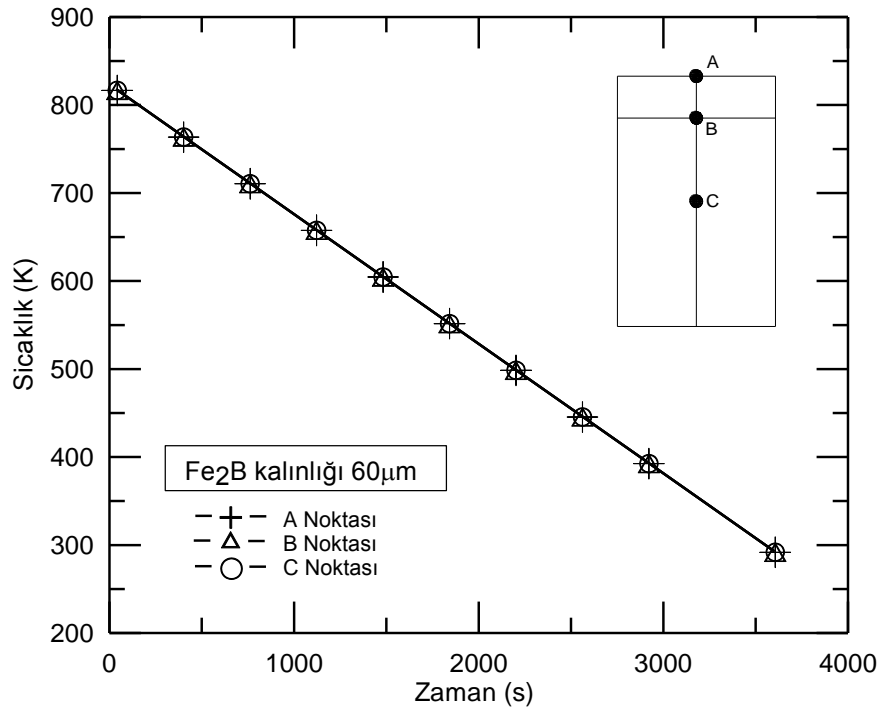
Şekil 4.8. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 40 µm).

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi tüm gerilmelerin değeri soğumaya bağlı olarak zamanla artmaktadır. A noktasındaki gerilme değeri basma türünde olup 62 MPa değerinden 670 MPa değerine yükselmektedir. B ve C noktalarında gerilme değerleri çekme

türünde ve A noktasındaki nazaran oldukça düşüktür. B noktasında 2,8 Mpa dan 29 Mpa değerine, C noktasında ise 1,1 MPa'dan 13 MPa değerine yükselmektedir. Benzer şekilde şekil 3'te gösterilen kayma gerilmesi de 9,7 MPa değerinden 133 MPa değerine yükselmektedir.

4.3. Tabaka Kalınlığı 60 μm için Analiz Sonuçları

60 μm 'lik borür tabakasına sahip model 4131 nokta ve 4000 elemana bölünmek suretiyle ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha önce model üzerinde belirlenen A, B, C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi şekil 4.9'da gösterilmiştir.

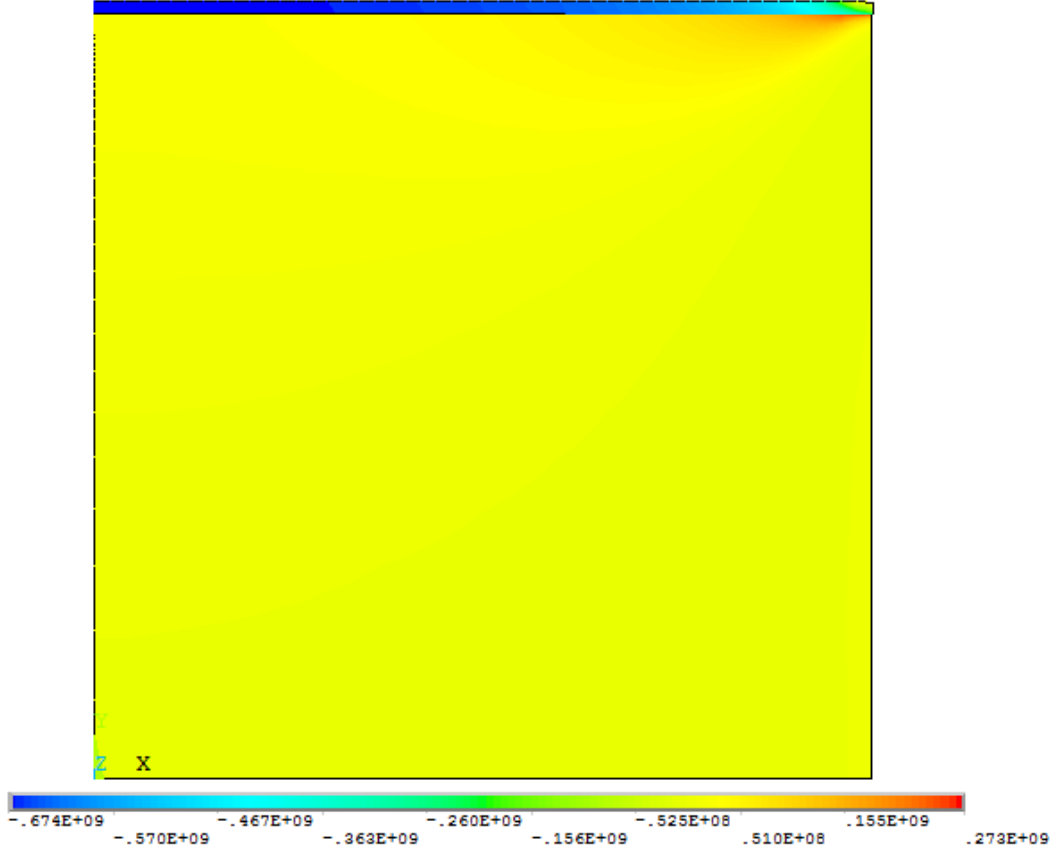


Şekil 4.9. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (Tabaka Kalınlığı 60 μm).

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi parça boyutlarının küçük olması nedeniyle parça içerisinde belirgin bir sıcaklık farkı görülmemiştir.

Soğutma işlemi sonunda x yönündeki artık ısıl gerilme dağılımı ise şekil 4.10'da görüldüğü gibidir. Görüldüğü gibi soğutma işlemi sonucunda borür tabakasında basma gerilmesi, çelik tabakada ise çekme gerilmesi oluşmaktadır. Çekme

gerilmesinin değeri daha küçüktür ve borür tabakasının hemen altındaki bölgede en yüksek değerine ulaşmıştır.



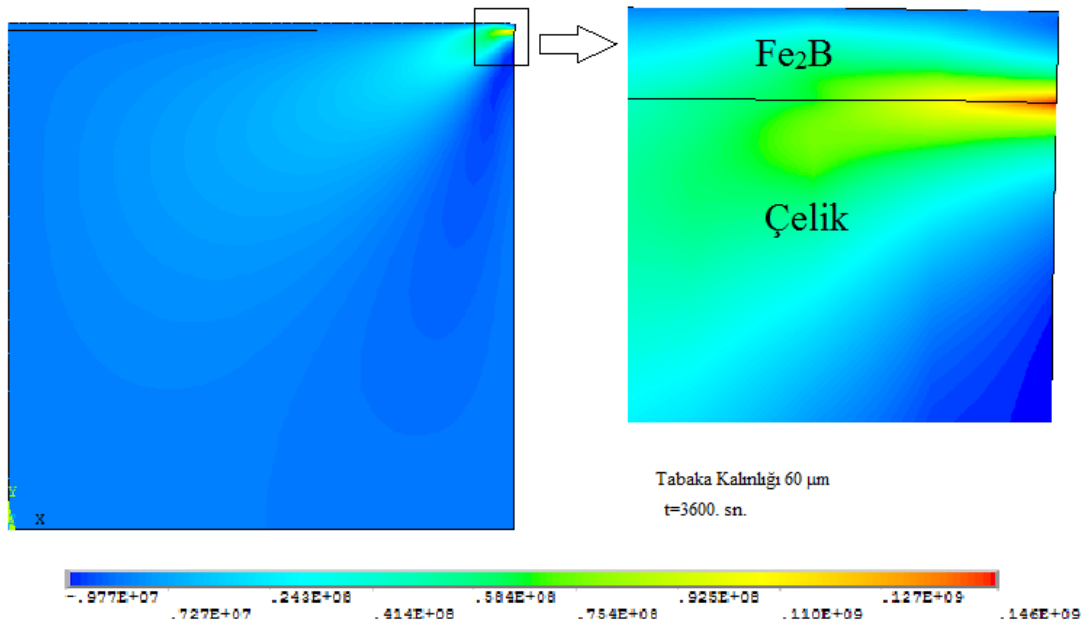
Şekil 4.10. x yönündeki gerilme dağılımı σ_x (tabaka kalınlığı 60 μm , $t=3600$. sn.).

Şekil 4.11’de soğuma sonrasında xy düzleminde kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Gerilmenin diğer tabaka kalınlıklarına benzer şekilde uç kısma gittikçe arttığı ve uç kısımla ara tabakanın kesiştiği noktada 146 MPa değerine ulaştığı görülmektedir.

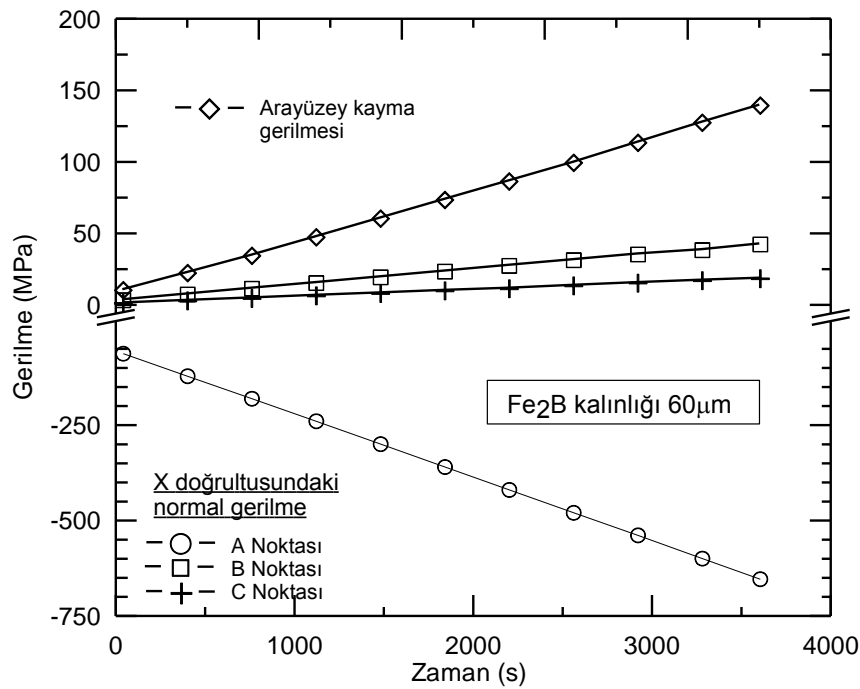
60 μm tabaka kalınlığı için A, B, C noktalarındaki x yönündeki normal gerilmenin ve şekil 4.11’de görülen kayma gerilmesinin en yüksek olduğu uç noktadaki kayma gerilmesinin, zamanla değişimini gösteren grafik şekil 4.12’de görülmektedir.

Görüldüğü gibi tüm gerilmelerin değeri soğumaya bağlı olarak zamanla artmaktadır. A noktasındaki gerilme değeri basma türünde olup 60 MPa değerinden 651 MPa değerine yükselmektedir. B ve C noktalarında gerilme değerleri çekme türünde ve A

noktasındaki nazaran oldukça düşüktür. B noktasında 4 Mpa dan 43 Mpa değerine, C noktasında ise 1,8 MPa'dan 19 MPa değerine yükselmektedir. Benzer şekilde şekil 8'de gösterilen kayma gerilmesi de 11 MPa değerinden 146 MPa değerine yükselmektedir.



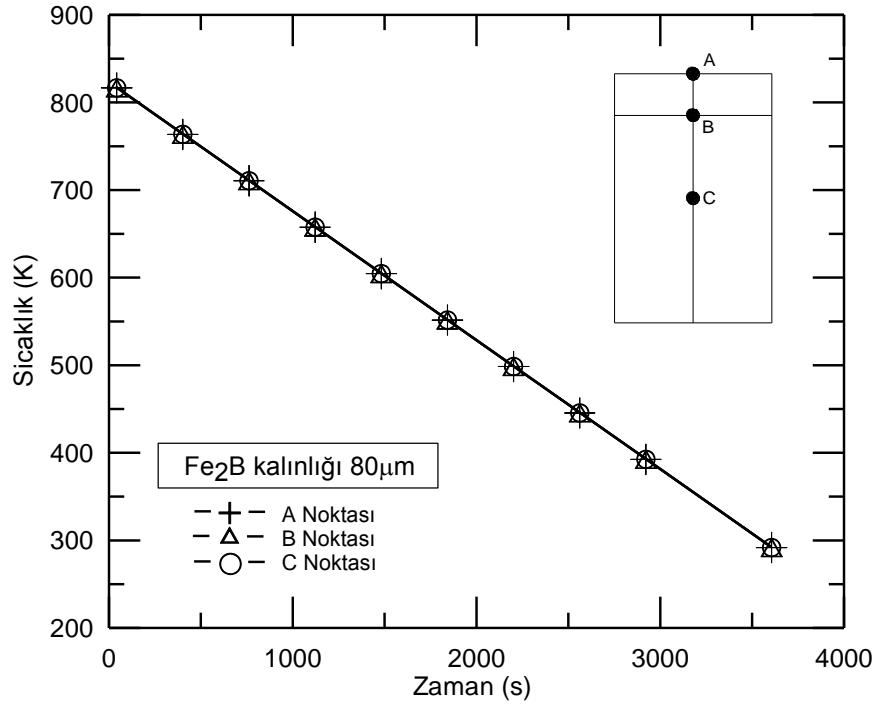
Şekil 4.11. xy düzlemi kayma gerilmesi dağılımı (Tabaka Kalınlığı 60 µm, t=3600. sn.)



Şekil 4.12. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 60 µm)

4.4. Tabaka Kalınlığı 80 μm için analiz sonuçları

80 μm 'lik borür tabakasına sahip model 4641 nokta ve 4500 elemana bölünmek suretiyle ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha önce model üzerinde belirlenen A, B, C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi şekil 4.13'te gösterilmiştir.

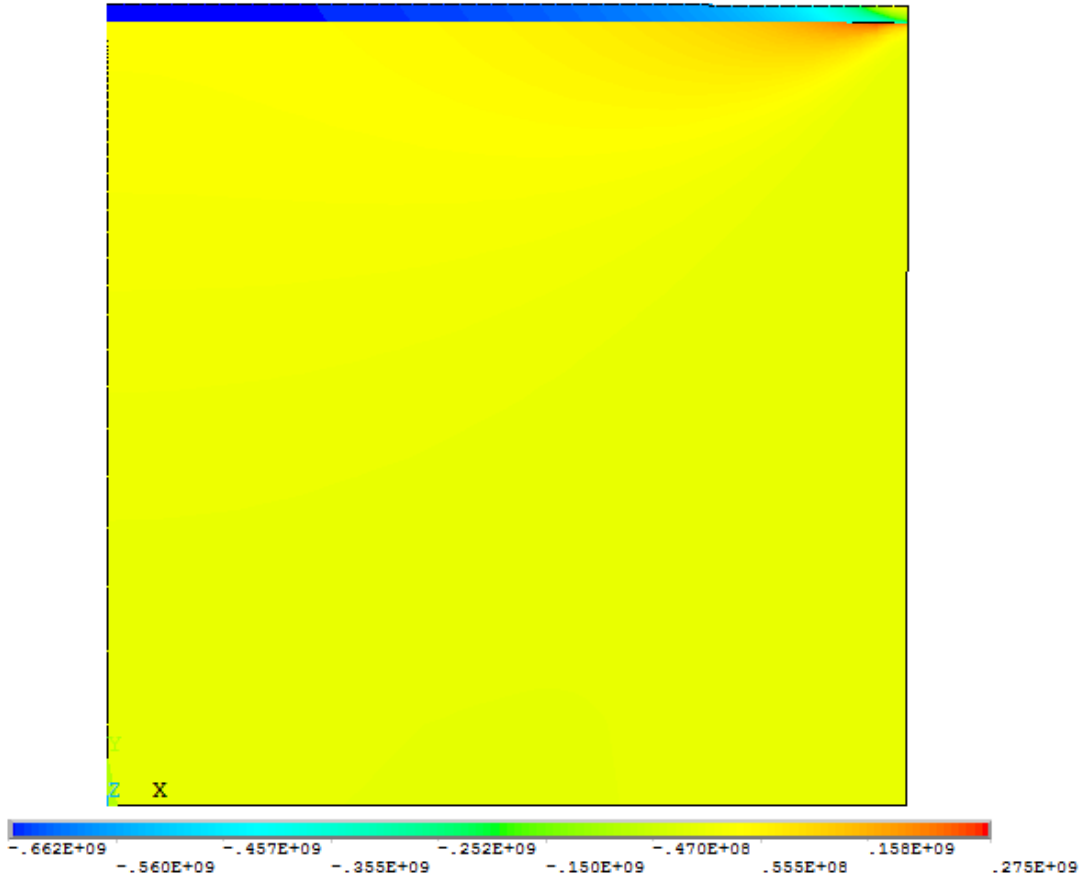


Şekil 4.13. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 80 μm)

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi parça boyutlarının küçük olması nedeniyle parça içerisinde belirgin bir sıcaklık farkı görülmemiştir.

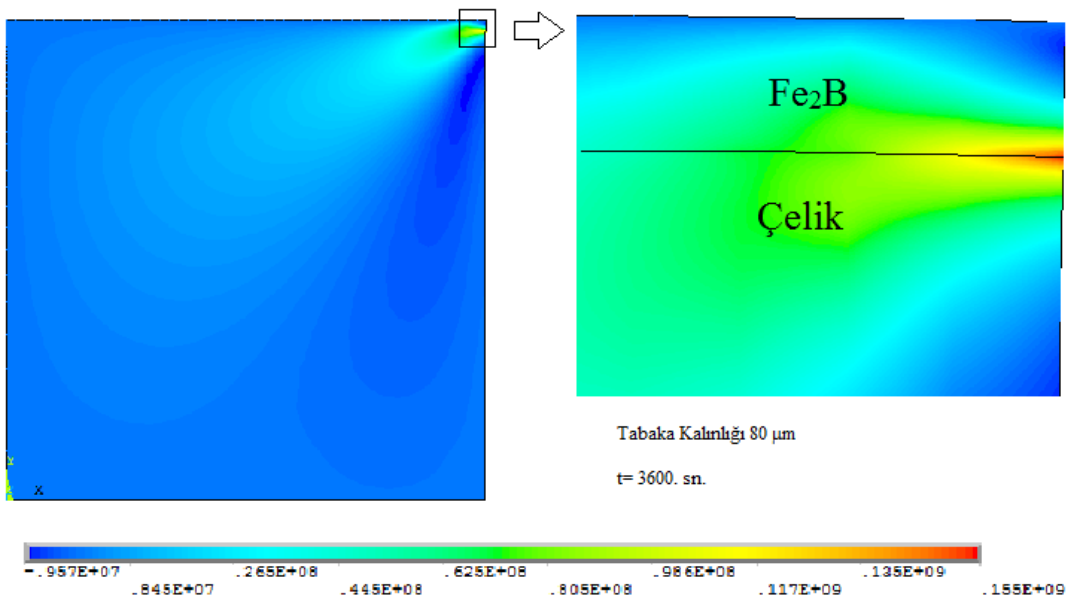
Soğutma işlemi sonunda x yönündeki kalıntı ısıl gerilme dağılımı ise şekil 4.14'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi soğutma işlemi sonucunda borür tabakasında basma gerilmesi, çelik tabakada ise çekme gerilmesi oluşmaktadır. Çekme gerilmesinin değeri daha küçüktür ve borür tabakasının hemen altındaki bölgede en yüksek değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.15'te ise soğuma sonrasında xy düzleminde kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.14. x yönündeki gerilme dağılımı σ_x (tabaka kalınlığı 80 μm , $t=3600$. sn.).

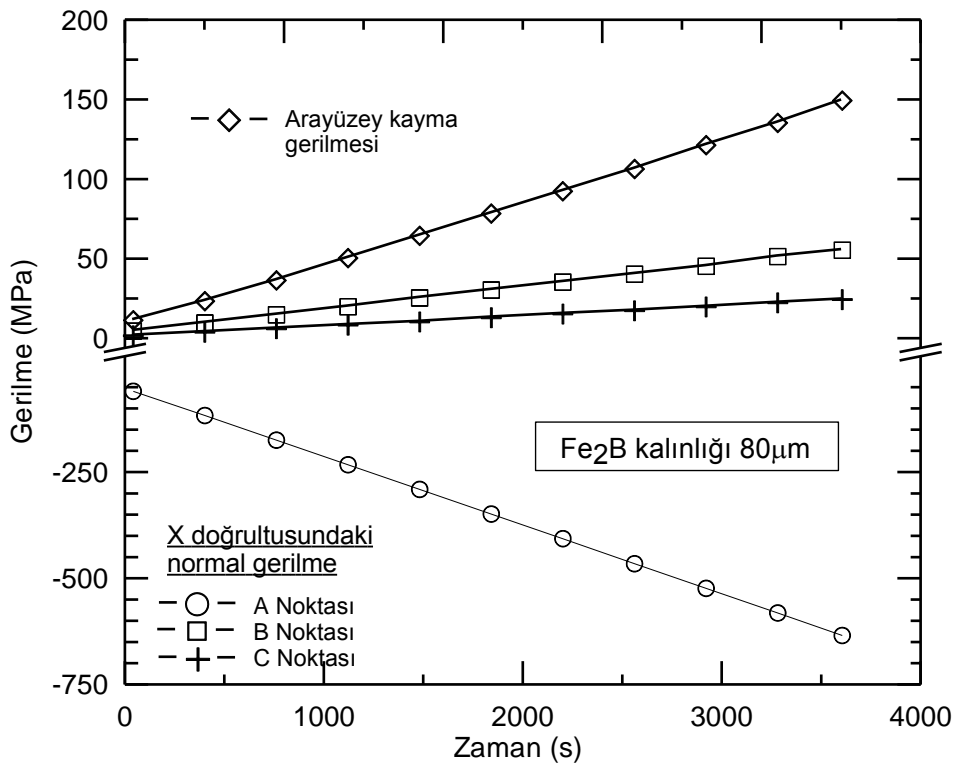
Kayma gerilmesinin, , uç kısma gittikçe arttığı ve uç kısımla ara tabakanın kesiştiği noktada en yüksek değeri olan 155 MPa değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.15. xy düzlemi kayma gerilmesi Dağılımı (Tabaka Kalınlığı 80 μm , $t=3600$. sn.).

80 μm tabaka kalınlığı için A, B, C noktalarındaki x yönündeki normal gerilmenin ve şekil 12’te görülen kayma gerilmesinin en yüksek olduğu uç noktadaki kayma gerilmesinin, zamanla değişimini gösteren grafik şekil 4.16’da görülmektedir.

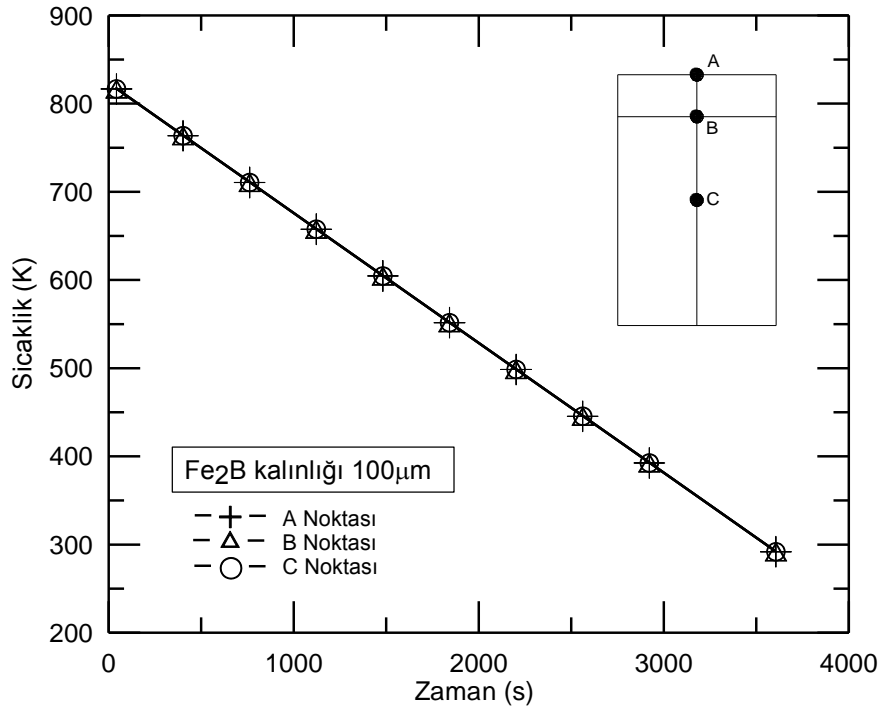
Görüldüğü gibi tüm gerilmelerin değeri soğumaya bağlı olarak zamanla artmaktadır. A noktasındaki gerilme değeri basma türünde olup 57 MPa değerinden 632 MPa değerine yükselmektedir. B ve C noktalarında gerilme değerleri çekme türünde ve A noktasındakine nazaran oldukça düşüktür. B noktasında 5,2 Mpa dan 56 Mpa değerine, C noktasında ise 2,3 MPa’dan 23 MPa değerine yükselmektedir. Benzer şekilde şekil 8’de gösterilen kayma gerilmesi de 12 MPa değerinden 155 MPa değerine yükselmektedir.



Şekil 4.16. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 80 μm).

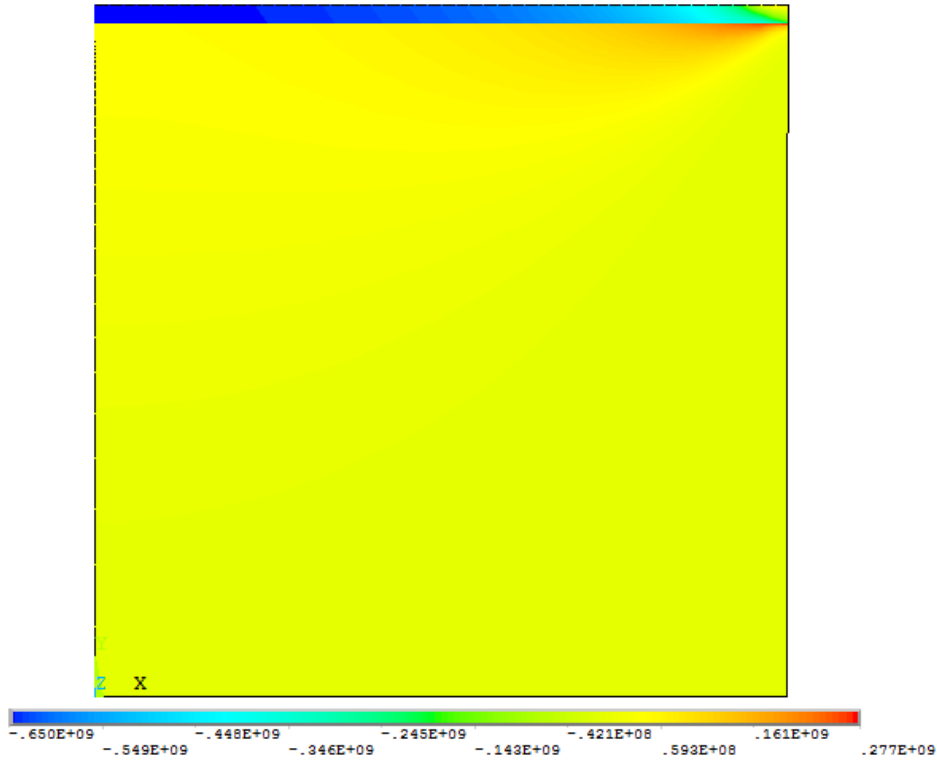
4.5. Tabaka Kalınlığı 100 μm için analiz sonuçları

100 μm 'lik borür tabakasına sahip model 5241 nokta ve 5000 elemana bölünmek suretiyle ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha önce model üzerinde belirlenen A, B, C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. A, B ve C noktalarındaki sıcaklıkların zamanla değişimi (Tabaka Kalınlığı 100 µm)

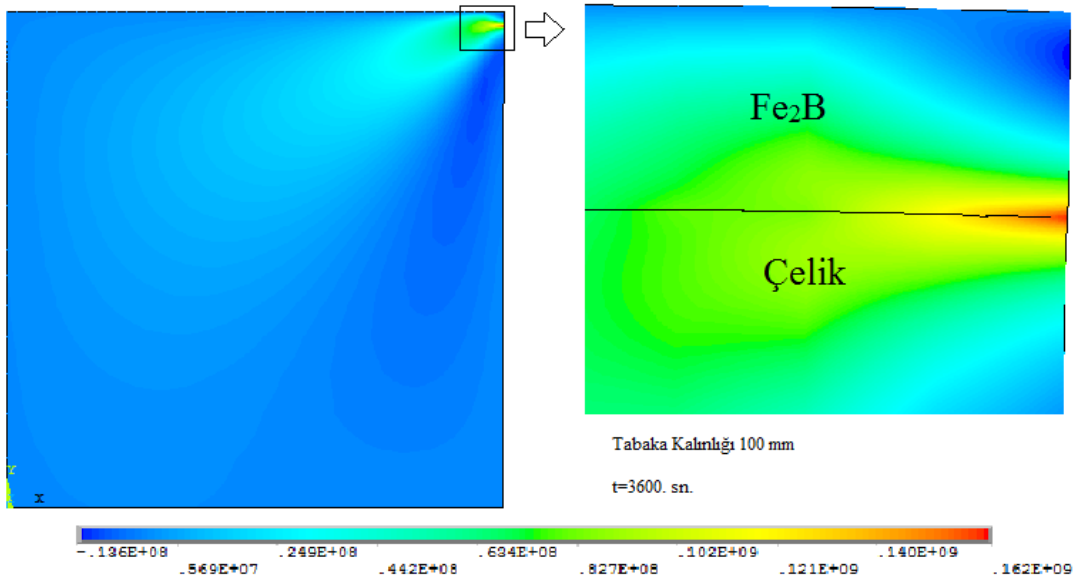
Şekil 4.17'de görüldüğü gibi parça boyutlarının küçük olması nedeniyle parça içerisinde belirgin bir sıcaklık farkı görülmemiştir.



Şekil 4.18. x yönündeki gerilme dağılımı (tabaka kalınlığı 100 µm, t=3600. sn.).

Soğutma işlemi sonunda x yönündeki kalıntı ısıl gerilme dağılımı ise şekil 4.18’de gösterilmiştir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi soğutma işlemi sonucunda borür tabakasında basma gerilmesi, çelik tabakada ise çekme gerilmesi oluşmaktadır. Diğer sonuçlara benzer şekilde çekme gerilmesinin değeri daha küçüktür ve borür tabakasının hemen altındaki bölgede en yüksek değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.19’da soğuma sonrasında xy düzleminde kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Gerilmenin, diğer tabaka kalınlıklarına benzer şekilde, uç kısma gittikçe arttığı ve uç kısımla ara tabakanın kesiştiği noktada 162 MPa değerine ulaştığı görülmektedir.

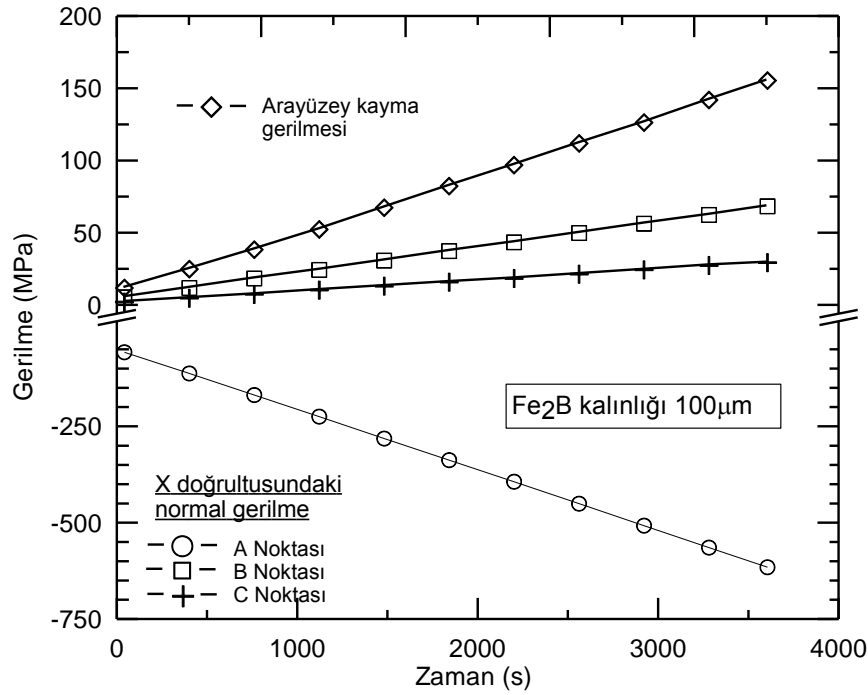


Şekil 4.19. xy düzlemi kayma gerilmesi dağılımı (tabaka kalınlığı 100 μ m, t=3600. sn.)

100 μ m tabaka kalınlığı için A, B, C noktalarındaki x yönündeki normal gerilmenin ve şekil 4.19’da görülen kayma gerilmesinin en yüksek olduğu uç noktadaki kayma gerilmesinin, zamanla değişimini gösteren grafik şekil 4.20’de görülmektedir.

Görüldüğü gibi tüm gerilmelerin değeri soğumaya bağlı olarak zamanla artmaktadır. A noktasındaki gerilme değeri basma türünde olup 55 MPa değerinden 614 MPa değerine yükselmektedir. B ve C noktalarında gerilme değerleri çekme türünde ve A noktasındakine nazaran oldukça düşüktür. B noktasında 6,3 Mpa dan 69 Mpa

değerine, C noktasında ise 2,7 MPa'dan 30 MPa değerine yükselmektedir. Benzer şekilde şekil 8'de gösterilen kayma gerilmesi de 14 MPa değerinden 162 MPa değerine yükselmektedir.



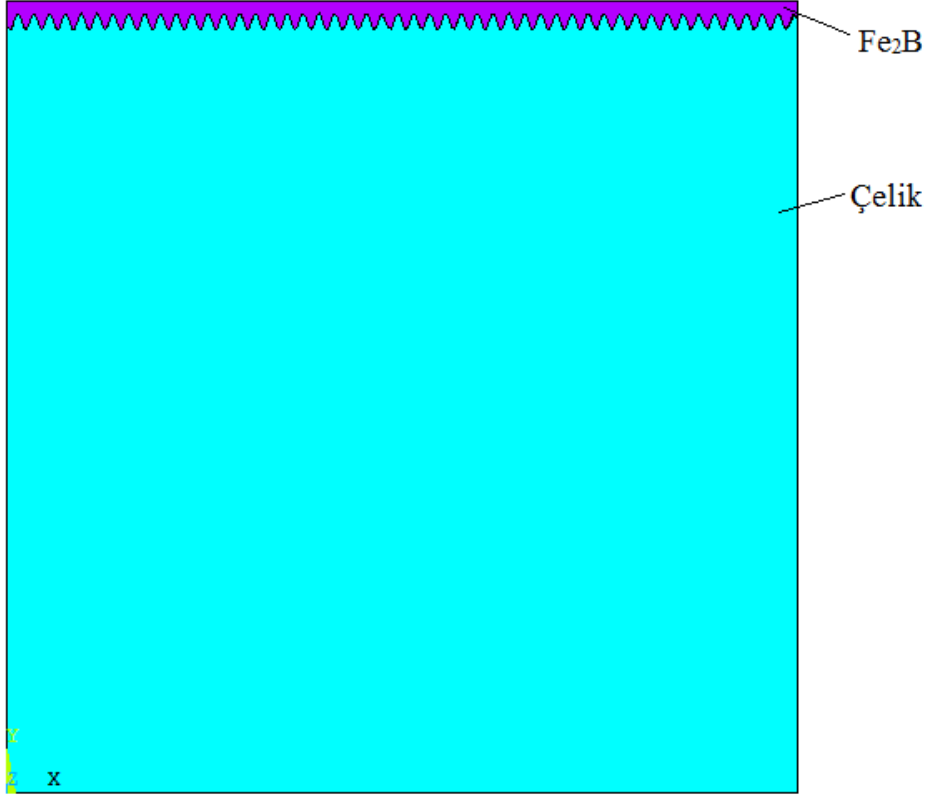
Şekil 4.20. Gerilmelerin zamanla değişimi (tabaka kalınlığı 100 µm)

Literatürde, yüzeyinde tek katmanlı borür tabakası içeren çelikler üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan borür tabakasındaki basma gerilmesinin 471 ile 700 MPa değerleri arasında değiştiği görülmüştür [9,10]. 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 [50].

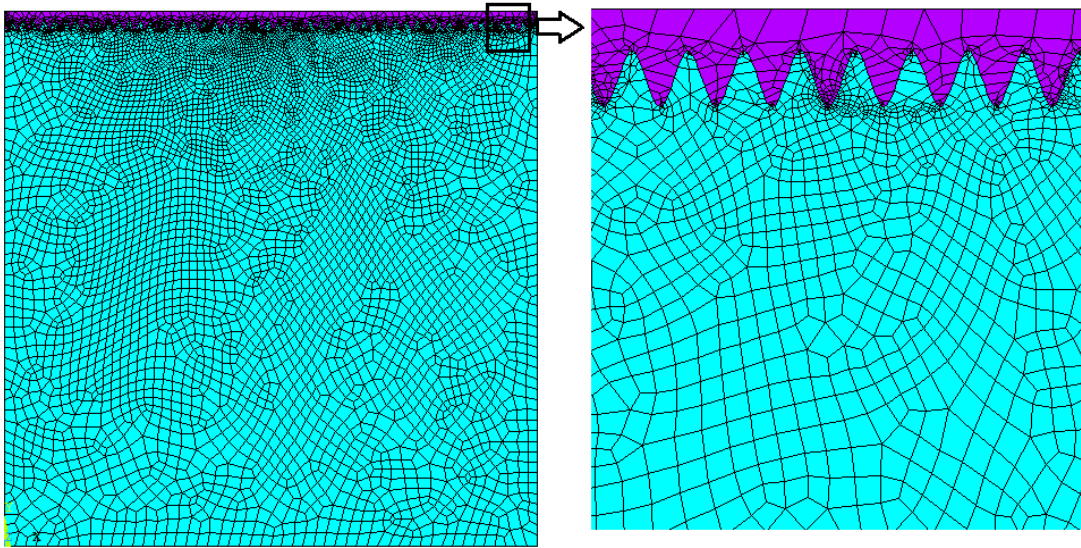
4.6. Testere Dişi Profilindeki Borür Tabakasındaki Gerilmelerin İncelenmesi

Bilindiği gibi borür tabakası oluşma fizyolojisi gereğince alt tabakaya doğru kolonsal büyümeler şeklinde oluşur. Bu oluşum neticesinde borür tabakası ile alt tabaka arasında testere dişlerine benzer bir görünüm meydana gelmektedir. Modellemenin gerçeğe daha yakın bir hale getirilmesi amacıyla testere dişi profiline sahip bir model oluşturulmuştur (şekil 4.21). Oluşturulan model ortalama 100 µm bor kalınlığına

sahip, model boyutları ise bir önceki bölümde bahsedilen düz profilli modelle aynıdır.



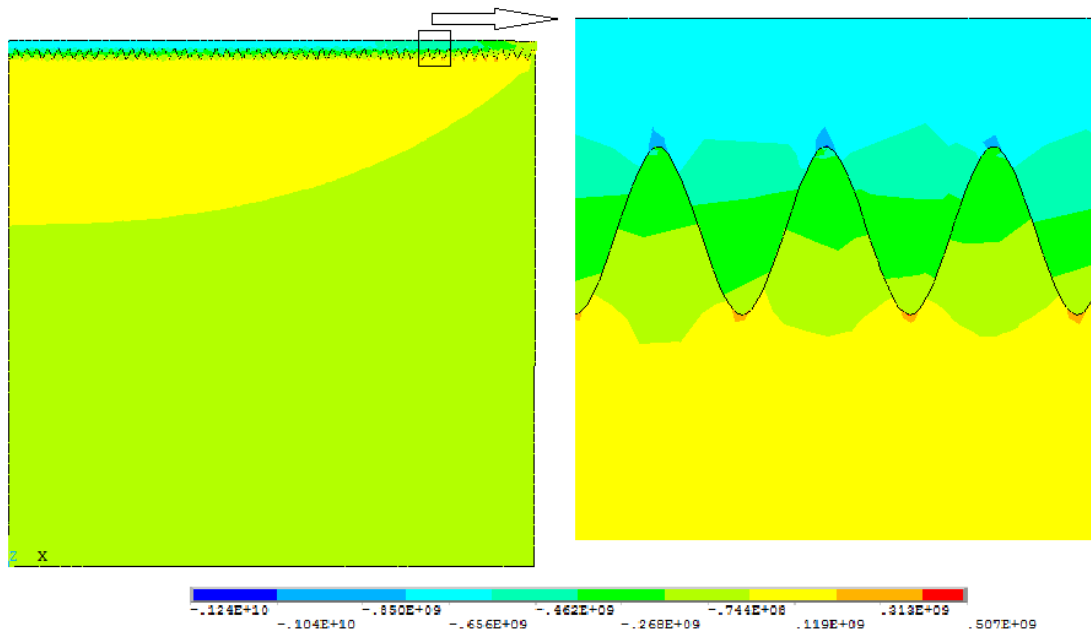
Şekil 4.21. Testere dişi profiline sahip model



Şekil 4.22. Modelin free mesh seçeneği ile oluşturulmuş ağ yapısı

Testere dişi profiline sahip bir alan yalnızca dörtgen elemanlardan oluşan mapped mesh seçeneği kullanılarak oluşturulamamaktadır. Bu nedenle bu profil düz profillerden farklı olarak üç kenarlı elemanların (triangular) da kullanıldığı 'free mesh' seçeneği kullanılarak oluşturulmuştur (şekil 4.22). Şekilden de görüldüğü gibi profildeki karışık şekil sebebiyle program otomatik olarak borür tabakası ve civarında daha sık bir ağ yapısı oluşturmuştur. Bu arada ağ yapısının düzgünsüzlüğü de göze çarpmaktadır.

Ağ yapısı oluşturulan modelin, düz profildekiyle aynı şartlarda 823 K'den oda sıcaklığı olan 293 K'e soğutulması simüle edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen x yönündeki gerilme dağılımı şekil 4.23'de gösterilmiştir.



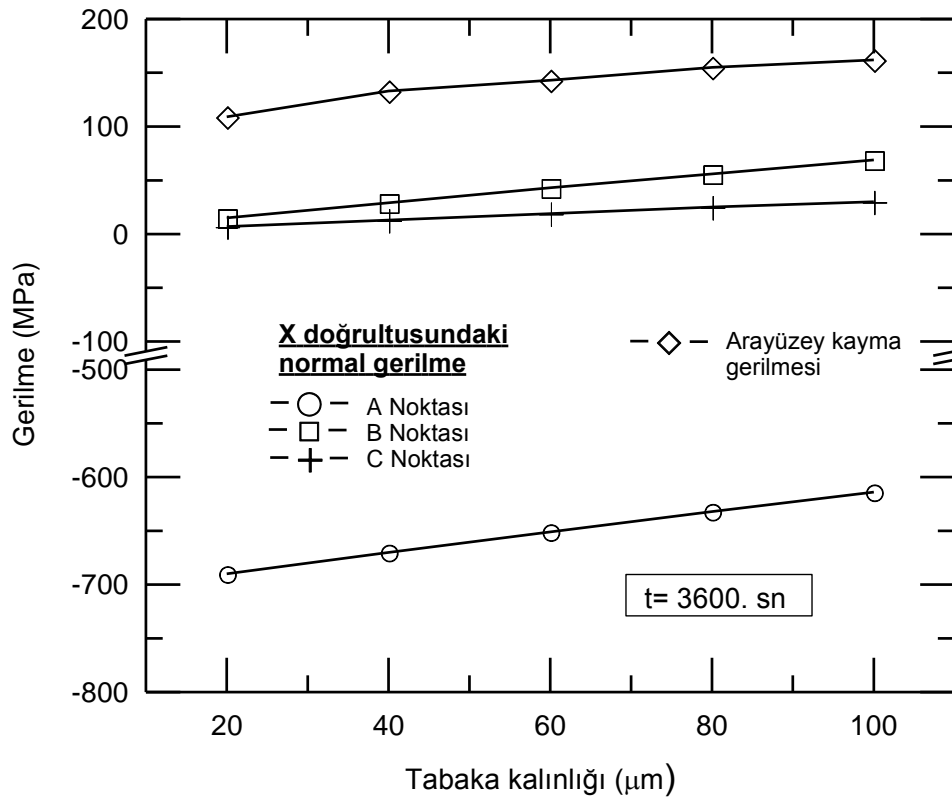
Şekil 4.23. x yönünde gerilme dağılımı σ_x (ortalama tabaka kalınlığı 100 μm , $t=3600$ sn.).

Şekil 4.23'te görüldüğü gibi borür tabakası genelinde gerilme değerleri basma türünde 650 ila 750 MPa şiddetinde düz profilde bulunan değerlere yakındır. Testere dişlerine benzer profillerin alt ve üst uçlarında ise gerilme yığılmaları olmaktadır. Borür tabakasına yakın uç kısımda gerilmeler yoğunlaşarak basma yönünde 1,24 GPa şiddetine kadar yükselmektedir. Bununla birlikte çelik tabakasına yakın uç kısımda ise çekme yönünde 540 MPa değerine kadar yükselmektedir. Bu durum, geometrinin özellikle testere dişi profilinin uç kısımlarında keskinleşerek gerilme

yığılmasına sebep olması ve yine testere dişi profili nedeniyle düzgün bir ağ yapısının oluşturulamamasından kaynaklanmaktadır.

Diğer tabaka kalınlıkları için de gerilmelerin testere dişi profillerinin uç kısımlarında aynı oranda yoğunlaştığı görülmüştür.

Şekil 4.24 soğuma sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin tabaka kalınlığına bağlı olarak değişimini göstermektedir. 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. Buna mukabil çelik malzeme üzerinde bulunan C noktası ile tabakalar arasında bulunan B noktasındaki artık gerilmeler ve arayüzdeki kayma gerilmesi tabaka kalınlığıyla birlikte artmaktadır.



Şekil 4.24. Tabaka kalınlığına bağlı olarak gerilmelerin değişimi

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tek katmanlı borür tabakasına (Fe_2B) sahip yüksek alaşımlı çeliğin borlanması neticesinde oluşan kalıntı ısı gerilmeler, beş ayrı tabaka kalınlığı için (20, 40, 60, 80, 100 μm), sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

5.1. Sonuçlar

Borlama işlemi neticesinde tek katmanlı borür tabakasında (Fe_2B) basma artık gerilmesi, yüksek alaşımlı çelik malzemede ise çekme artık gerilmesi oluşmaktadır. Bu durum altlık durumundaki çelik malzemenin ısı genleşme katsayısının borür tabakasından yüksek olması sebebiyledir. Tabakalar soğurken, çelik malzeme daha çok büzülme neticesinde üstündeki borür tabakasını sıkıştırarak basma gerilmelerine maruz bırakılmaktadır. Bunun karşılığında çelik malzemede de çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

Parça boyutlarının küçük olması nedeniyle, parça içerisinde belirgin bir sıcaklık farkı görülmemektedir. Bu nedenle oluşan kalıntı gerilmelerin sadece malzemelerin ısı genleşme katsayısının farklı olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Oluşan artık gerilmeler zamanla artmaktadır. Bunun sebebi zamanla iki tabaka arasındaki büzülme miktarları arasındaki farkın artmasıdır. Tabaka kalınlığının artmasıyla borür tabakasında basma gerilmelerinin azaldığı ve arayüzeyde kayma gerilmelerinin arttığı görülmüştür.

Yapılan bu çalışma sayesinde modelleme ve sınır şartlarının doğru tanımlanması durumunda, borlanmış parçalarda soğuma esnasında oluşan ısı gerilmelerin simüle edilebileceği anlaşılmıştır.

5.2. Öneriler

Tabaka kalınlığının artmasıyla borür tabakasında basma gerilmelerinin azalması mekanik yüklere karşı mukavemeti düşürmekte bunun yanında borür tabakasının altlık malzemeye tutunma davranışını olumsuz etkilemektedir. Kayma gerilmesinin artması tabaka ayrılması riskini doğurabilmektedir. Bu nedenle, bu tür yüzey işleminde tek fazlı borür tabakası oluşturulmuş olmasına rağmen, kalınlığın aşırı değerlerde olmaması önerilir.

Bu çalışmada tek katmanlı bor tabakasının (Fe_2B) kalıntı gerilme durumu incelenmiştir, uygulamada sıkça görülen ve sorunlara neden olan çift katmanlı borür tabakasındaki kalıntı gerilmeler bu çalışma yardımıyla araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] YILMAZ, A., Her derde deva bor hazinemiz bor, Bilim ve Teknik Dergisi, sayı 414, s. 38-48, 2002.
- [2] DELİKANLI, K., ÇALIK, A., UZUN, H., Sade karbonlu bir çeliğin borlama özelliklerinin incelenmesi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,5.1, 2003.
- [3] SINHA A.K., Boriding (Boronizing), J.Heat Treating, American Society for Metals, Metals Park, OH, 437, 1991.
- [4] HELVACI, C., Türkiye borat yatakları, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5.1, 2003.
- [5] UZUN, H.A., Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları, Yüksek lisans tezi, T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2002.
- [6] ŞEN, U., ŞEN, S., YILMAZ, F., An avaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron, Journal of Materials Processing Technology, 148, pp.1-7, 2004.
- [7] CAMPOS, I., OSEGUERA,J., FIGUEROA, U., GARCIA, J.A., BAUTİSTA, O., KELEMENİS, G., Kinetic study of boron diffusion in the paste-boriding process, Metarials Science & Engineering, A352, pp.261-265, 2003.
- [8] ÇELEBİ, G., İPEK, M., BİNDAL, C., Borlanmış AISI 8620 çeliği yüzeyinde oluşan bor tabakasının bazı mekanik özellikleri, 1. Ulusal Metalurji ve Malzeme Günleri Bildiri Kitabı, Eskişehir, s.37-47, 2004.
- [9] CAMPOS-SİLVA I., HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ E., RODRÍGUEZ-CASTRO G., RODRÍGUEZ-PULIDO A., LÓPEZ-GARCÍA C., ORTÍZ-DOMÍNGUEZ M., 'Indentation size effect on the Fe₂B/substrate interface' Surface and Coatings Technology, 2011.
- [10] ZHENZHAN L., ZİMİNG W., XİCHEN S., The influence of internal stress and preferred orientation on the abbrasive wear resistance of a boronized medium carbon steel, Wear, 1990.

- [11] ERICSSON T., Residual stresses caused by thermal and thermochemical surface treatments, *Advances in Surface Treatments*, vol4, s 110-112, 1985.
- [12] ÇELEBİ G. F., 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 Çeliklerinin borlama kinetiklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Sakarya, 2005.
- [13] ÖZBEK, İ., Borlama yöntemiyle AISI M50, AISI M2 yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performansının geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 1999.
- [14] ER, Ü., Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş çeliklerin aşınmaya karşı dayanımlarının ve pulluk uç demirlerinde uygulama olanaklarının araştırılması, Doktora Tezi, T.C. Osmangazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2003.
- [15] ULUKÖY A., CAN A.Ç., Çeliklerin borlanması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Denizli, 2006.
- [16] <http://www.bortec.de/boronizing.htm> Erişim Tarihi: 15.03.2013.
- [17] TEZCAN, R., Borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Osmangazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1996.
- [18] KULKA, M., PERTEK, A., Characterization of Complex (B +C+N) Diffusion layers formed on chromium and nickel-based low-carbon steel, *Applied Surface Science*, V218, s. 113-122, 2003.
- [19] UĞUR, Ş., Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, Aralık 1997.
- [20] RIE, K.T., Recent advances plasma diffusion process, *Surface Coatings Technology*, Vol 112, pp.56, 1999.
- [21] CABEO, E.R., LAUDIEN, G., BIEMER, S., RIE, K.T., HOPPES, S., Plasma-assisted boriding of industrial component in a pulsed d.c. glow discharge, *Surface Coatings Technology*, Vol116, pp.229- 233, 1999.
- [22] ATİK, E., Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi : borlama, *Makine ve Metal Dergisi*, sayı 117, s. 24-28, 2001.
- [23] KARAKULLUKÇU F., Dekarbürize işleminin AISI H13 çeliğinin borlanma davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üni., 2002.
- [24] SELÇUK, B., İPEK, R., KARAMIŞ, M.B., AISI 5115 ve AISI 1020 çeliklerinin çekme özelliklerine borlamanın etkisi”, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s. 60-69, Denizli, 12-14 Nisan 1995.

- [25] KARAMIŞ, B.M., NAİR, F., SELÇUK, B., Borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, sayfa 446-454, Denizli, 12-14 Nisan 1995.
- [26] ÖZSOY, A., Çeliğin borlanmasında borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1991.
- [27] BİNDAL, C., az alaşımlı çelikler ve ticari karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borür tipi seramik kompozitlerin bazı özelliklerinin tespiti, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Haziran 1991.
- [28] ÖZBEK, İ., BİNDAL, C., Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, Surface Coatings Technology, 154,pp.14-20, 2002.
- [29] ŞEN, Ş., Termokimyasal borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey performansının geliştirilmesi, Doktora Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran 1998.
- [30] GENEL, K., ÖZBEK, İ., BİNDAL, C., Kinetics of boriding AISI W1 steel, Materials Science and Engineering, A347, pp.311-314, 2003.
- [31] KEDDAM, M., A kinetic model for the borided layers by the paste boriding process, Applied Surface Science, 236, pp.451-455, 2004.
- [32] KARAKULLUKÇU, F., GENEL, K., İPEK, M., Dekarbürizasyonun AISI H13 çeliğinin borlanma davranışına etkisi, SAÜ Fen Bilimleri Dergisi, cilt 6. sayı 3. Eylül 2002.
- [33] DELİKANLI, K., ÇALIK, A., UZUN, H.A., Sade karbonlu bir çeliğin borlama özelliklerinin incelenmesi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2003.
- [34] MERİÇ, C., ŞAHİN, S. ve YILMAZ, S. S., Investigation of the effect on boride layer of powder particle size used in boronizing with solid boron-yielding substances, Materials Research Bulletin, 35C : 2165-2172, 2000.
- [35] BOZKURT, N., Bor yayınımlı ile çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Eylül 1984.
- [36] ŞEN, Ş. 'The characterization of vanadium boride coatings on AISI 8620 steel', Surface & Coatings Technology, 2004.
- [37] YAPAR, U., Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Mayıs 2003.

- [38] BAŞMAN G., AISI 316L tipi paslanmaz çeliğin termokimyasal difüzyon yöntemi ile borlanması, borlama banyosu bileşenlerinin borür tabakası özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Şubat 2010.
- [39] GENEL K., Boriding kinetics of H13 steel, Vacuum, 2005.
- [40] GÜNAY, D., Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri, Sakarya Üniversitesi Yayınları, Adapazarı, 1993.
- [41] CAMPOS-SILVA I., ORTÍZ-DOMÍNGUEZ M., LOPEZ-PERRUSQUÍA N., MENESES-AMADORA A., ESCOBAR-GALÍNDO R., MARTÍNEZ-TRINIDAD J., Characterization of AISI 4140 borided steels, Applied Surface Science, 2010.
- [42] GENEL K., ÖZBEK İ., BİNDAL C., 'Kinetics of boriding of AISI W1 steel', Materials Science and Engineering, 2003.
- [43] ÖZBEK İ., BİNDAL C., Kinetics of borided AISI M2 high speed steel, Vacuum, 2011.
- [44] LAKHTİN M., PCHELKİNA M., Boronizing of high-alloy steels, Surface Impregnation and Treating, 1961.
- [45] <http://www.matweb.com> Erişim Tarihi: 12.03.2013.
- [46] <http://www.schmolz-bickenbach.de/> Erişim Tarihi: 12.03.2013.
- [47] XIAO B., FENG J. ve arkadaşları, The elasticity, bond hardness and thermodynamic properties of X_2B ($X=Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo, W$) investigated by DF theory, Physica B, 2010.
- [48] KULKA M., PERTEK A., Gradient formation of boride layers by borocarburing, Applied Surface Science, 2008.
- [49] ÖZSOY İ., Y 32 bojisinin bilgisayar destekli statik ve dinamik analizi, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
- [50] PRÜMMER R., PFEIFFER W., Residual stresses in borided layers, Journal of the Less Common Metals, 1986.
- [51] MARTINI, C., PALOMBORINI, G., POLI, G., PRANDSTRALLER, D., Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings, Wear, 256, pp.608-613, 2004.
- [52] KARAKAN, M., ALSARAN, A., ÇELİK, A., Plazma borlama, Mühendis ve Makine Dergisi, sayı 512, s. 32-36, 2001.
- [53] USLU İ., AISI 1040 ve AISI P20 Kalıp Çeliklerinin Borlama Kinetiği, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Yasin Kuddusi KUTUCU, 4.12.1986 yılında Kastamonu'da doğdu, ilköğretim ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2010 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu, aynı yıl Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Tasarım ve İmalat Programı'nda yüksek lisans öğrencisidir.