

Cam şekillendirme makinalarındaki aşınan parçalara uygulanan yüzey işlemlerinin performansa etkileri

A. Yüksel SOYKUT*, E. Sabri KAYALI

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yüzey işlemleriyle malzemenin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri yanında sürtünme ve aşınma, oksidasyon ve korozyona karşı dayanıklılık özellikleri geliştirilmektedir. Sürtünerek çalışan makina elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Yaşanan malzeme ve ürün kayıplarını, cam şekillendirme makinalarında minimuma indirmek ve söz konusu bu nedenlerden kaynaklanan duruş ve üretim kayıplarını azaltmak amacı ile gerçekleştirilen bu çalışmada; cam üretim makinalarında kullanılan kalıp kollarının malzemelerine alternatif malzeme ve kaplama türleri denenmiştir. Cam şekillendirme makinalarında mevcut kalıp kolu malzemesi olan AISI 420 kalite çeliğe alternatif olarak seçilen yüzeyi kaplanmış (nitrokarbürleme, sert krom kaplama, akımsız nikel kaplama ve borlama) üç farklı kalitede çelik (AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çelikler) malzeme, kalıp kollarındaki gerçek aşınma şartlarını simule edebilecek şekilde tasarlanan laboratuvar deneyleri için standart numuneler olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere, metal-metal deneyleri yapılarak aşınma davranışları incelenmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde nem ve sıcaklık sabit tutulmuştur. Metal-metal aşınma deneylerinde, pimlere M2 kalite takım çeliği üzerinde aşınma testi uygulanmıştır. Farklı kalitede çelikten imal edilmiş olan kaplanmış taban malzemelerine uygulanan disk üstünde pim deneyi sonucunda kullanılmakta olan sert krom kaplı ve kaplamasız AISI 420 kalite çeliğin bor kaplı AISI 4140 kalite çelik malzemeye göre aşınma oranının sırasıyla yaklaşık 18.67 ve 184 kat daha çok olduğu tespit edilmiştir. Laboratuvar deneylerinin sonucunda AISI 4140 kalite çelik malzeme üzerine borlama ön plana çıkmış ve kalıp kollarının çalışma koşullarında aşınmaya en dayanıklı kaplama ve taban malzemesi olarak borlanmış AISI 4140 kalite çelik kabul edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Borlama, cam şekillendirme makineleri, kalıp kolu.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: A. Yüksel SOYKUT. ysoykut@sisecam.com; Tel: (212) 350 31 97.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Programı'nda tamamlanmış olan "Cam şekillendirme makinalarındaki aşınan parçalara uygulanan yüzey işlemlerinin performansa etkileri" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 28.01.2008 tarihinde dergiye ulaşılmış, 16.04.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

The performance effects by surface treating for worn parts in the glass forming machines

Extended abstract

The materials science in our country has provided significant developments in recent years. Glass industry has also needed to develop its glass forming machines and their parts for manufacturing the high quality with low price in this competitive environment for being in line with the demands of customers. As a result of this change in the business environment, the selection of materials being used in glass forming machines and the surface treatments applied on these materials have developed in accordance with the technology.

Friction, wear, oxidation and corrosion properties of materials can be improved in addition to an increase of the ductility, hardness and fatigue properties of materials by using surface treatment.

At glass forming machines, the mechanism which provides the mould to adapt into the glass machine, is called as the arm mould. Although mould and arm mould materials show similar properties, the responsibilities they undertake are totally different from each other. If the expectation from mould material can be described as resistivity to heat and surface roughness at metal glass interface, then the expectation from arm mould can be limited as resistivity to wearing and general suitability to the machine's material. The aim of this study to find an alternative material to the arm mould material as coated or uncoated conditions which are used at the glass forming machines in order to decrease the loss of discarded materials and product at glass machines.

As alternatives to the existing arm mould material AISI 420, various kinds of steels (AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140) were coated with different kinds of coatings as nitrocarburizing, hard chrome coating, boronizing and electroless nickel coating. To simulate the real working condition of arm moulds at the laboratory conditions, standard specimens are prepared for pin on disc tests. Specimens were at standard of ASTM G99 with a diameter of 4 mm. Specimens and disc are always cleaned at each test and dry friction conditions are provided. During laboratory tests, humidity and room temperature is controlled at 50 ± 5 and $20\pm 2^\circ\text{C}$ respectively.

At metal-metal tests, specimens as a pin are fixed on a steel disc with a fixed load where the disc rotates at a constant speed. Tests are applied on M2 steel disc with 0.52 m/s sliding speed, under 5 kg load and at a total sliding distance of 6000 m. Before and after each wear test, the differences at specimens in terms of height (ΔH) and weight (ΔG) are measured with a sensitivity variance of 0.01 mm and 0.1 mg respectively at every 2000 m sliding distance

Steel specimens without any surface treatment have surface hardness values in the range of 170 and 210 HV. After the surface treatment (nitrocarburizing, hard chrome coating and electroless nickel coating) processes, these specimens surface hardness increased up to 800 HV. However, after the boronizing process, specimens' surface hardness increased to the higher values up to 1110–1495 HV.

The results of wear tests are analyzed according to the weight loss of the materials. The relative wear ratio (RWR) is defined as the ratio of the weight loss of a specimen to the weight loss of the reference material, which is defined as the most wear resistant specimen at the wear tests. The most wear resistant material was found as the boronized AISI 4140 steel specimen from the weight loss values.

From the results of the pin on disc tests, the specimens' weight losses are calculated to identify the relative wear ratio values. Non-coated AISI 420 specimen had the weight loss of 0.0552 gr, hard chrome coated AISI 420 specimen had the weight loss of 0.0056 gr, boronized AISI 4140 specimen had the weight loss of 0.003 gr at 2.000 m sliding distance. From the comparison of the RWR values of the studied steels, it is found that the boronized AISI 4140 steel is the highest wear resistance material. The RWR values show that the boronized AISI 4140 steel is 18.7 times better than hard chrome coated AISI 420 steel, and 184 times better than uncoated AISI 420 steel in terms of wear resistance.

As the results of the wear tests, the boronized AISI 4140 steel is determined as the most wear resistant material in the studied steels and suitable to use as the arm mould material in the glass forming machines.

Keywords: Boronizing, glass forming machines, arm mould.

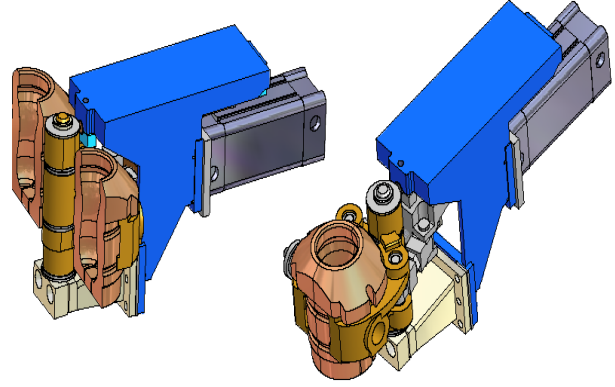
Giriş

Yüzey mühendisliği, aşınma problemine çözüm üretmek amacıyla son yıllarda endüstriyel alanlarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Yüzey işlemleriyle malzemenin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri yanında sürtünme ve aşınma, oksidasyon ve korozyon özellikleri de geliştirilmektedir. Sürtünerek çalışan makina elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden karbürleme, nitrokarbürleme, borlama, sert krom kaplama ve çeşitli yüzey kaplama teknikleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen zararın, gayri safi milli hasılanın % 7'sini teşkil ettiği görülmüş ve bu yönde çalışmalara ağırlık verilmesi önerilmiştir. Buna malzemenin korozyon sonucu bozulması ile meydana gelen kayıpları da eklersek, bu oran % 10-12 civarına yükselmektedir. Aşınma ve korozyona dayanıklı malzemelerin pahalı olması nedeni ile, kullanılan parçaların sadece yüzeylerinin kaplanmasıyla istenilen özelliğe sahip malzemeler elde edilerek maliyetlerin düşürülmesi yoluna gidilmektedir (Eyre, 1978).

Cam makinalarında kalıbın cam makinasına adaptasyonunu sağlayan mekanizma kalıp kolu olarak adlandırılır (Şekil 1). Kalıp ve kalıp kolu özellikleri benzerlik gösterse de üstlendikleri görev açısından büyük farklılık göstermektedir. Kalıp malzemesinden metal cam ilişkisinde beklenti, ısıya karşı direnç ve yüzey pürüzlülüğü olarak özetlenirse de kalıp kolunda aşınmaya karşı mukavemet ve genel makina malzemesine uygunluk olarak sınırlandırılabilir.

Cam kalıp kollarının birbiri üzerinde çalışan veya kalıp ile temas eden yüzeylerinde aşınma ve korozyon gibi etkilerle malzeme, ürün ve işgücü kayıpları oluşmaktadır (Şekil 2). Bu kayıpların önüne geçilebilmesi, dolayısıyla verimliliğin artırılabilmesi için aşınma veya korozyon mekanizmalarının işleyişini bozacak yöntemler uygulanmalıdır.



Şekil 1. Cam makinasında kalıp taşıyan bir kalıp kolunun açık ve kapalı 3 boyutlu çizimi

Birçok uygulamada aşınma ve korozyona dayanıklı olan malzemelerin kullanılması ekonomik açıdan tercih edilmemekte, birçok uygulama için ise uygun olmamaktadır. Bu durumda malzemeyi değiştirip bu tür hasarlara dayanıklı malzeme seçimi verimliliği artırmayacaktır. Geriye temas yüzeylerinin aşınmaya karşı direncinin geliştirilmesi kalmaktadır.



Şekil 2. Aşınmış ve korozyona uğramış durumdaki kullanılmış bir kalıp kolu

Yaşanan malzeme ve ürün kayıplarını, cam şekillendirme makinalarında minimuma indirmek ve söz konusu bu nedenlerden kaynaklanan kayıpları azaltmak amacı ile gerçekleştirilen bu çalışmada; cam üretim makinalarında kullanılan kalıp kollarının malzemelerine alternatif malzeme ve kaplama türleri incelenmiştir.

Kaplama işlemlerinin yüzeylerin sürtünme ve aşınma davranışlarına etkileri

Borlama, farklı endüstriler için yakın zamanda geliştirilmiş bir termo kimyasal procestir (Campos ve Oseguera, 2003). Borlama, malzeme yüzeyinde istenen yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve iyi oksidasyon direnci sağlayan en elverişli yüzey sertleştirme yöntemlerinden biridir.

Borlama işlemi, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700-1000°C sıcaklık aralığında, 1-10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir (Matuschka, 1980). Borlamanın demir, demir dışı ve süper alaşım gibi geniş bir malzeme üzerinde uygulaması yapılmaktadır (Novakova ve Sizov, 2004).

Borlama sonucu oluşan borür fazlarının en önemli özelliği yüksek sertliğe (1400-1500 HV) ulaşması ve çelik türü malzemelerde 650°Cye kadar kalıcı olmasıdır. Borlama sıcaklığı ve işlem süresine bağlı olarak bor katman kalınlıklarının 225 µm'a kadar arttığı gözlenmiştir (Şen, 1997).



Şekil 3. Borlanan malzemenin kesitine bakıldığında, yapının üç bölgeden oluştuğu görülür. a) FeB ve Fe₂B içeren borür katmanı, b) Geçiş bölgesi, c) Matris

Borür fazlarının özellikleri üç parametreye bağlıdır: Altlık malzemenin kompozisyonu,

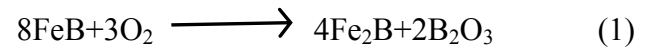
proses sıcaklığı ve ısıtma süresi. Borlanan malzemeye kesitten bakıldığında, yapının üç farklı bölgeden oluştuğu görülür (Şekil 3). Yüksek sıcaklıkta yapılan borlamanın difüzyon kontrollü bir proses olduğu, istenilen kalınlık ve sertlikteki bor katmanın oluşturulabilmesi için proses parametrelerinin doğru tayin edilmesi gerekmektedir (Genel vd., 2003).

Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk kaynaklanma eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir (Sinha, 1991).

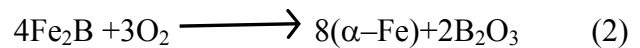
Eyre borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirtmektedir (Eyre, 1978).

Borlanmış çeliklerin sürtünme ve aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörlerden biri de koruyucu oksitlenmedir. Borun oksijene karşı ilgisi (afinitesi) yüksektir ve hemen hemen bütün borürler yüzeyde çok ince bir oksit filmi oluştururlar. Yüzeyde oluşan bu B₂O₃ tabakası, bir tür katı yağlayıcı vazifesi görerek hem sürtünme katsayısını hem de kaynamayı düşürmekte dolayısıyla adhezif aşınmayı önlemektedir (Holmberg ve Matthews, 1994).

FeB tabakasında FeB'nin bileşeni olan bor, ortamdaki oksijenle tercihli olarak reaksiyona girerek yüzeyde B₂O₃-Fe₂B tabakaları oluşturur. Bunun sonucunda Fe₂B tabakası kalınlığında artış meydana gelir.



Fe₂B tabakasında ise Fe₂B'nin bileşeni olan bor, oksijenle birleşerek B₂O₃ ve α-demiri meydana getirir.



Borlamanın sürtünme katsayısına etkilerini araştıran araştırmacıların hemen hepsi borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Geoeuriot ve diğerleri (1983), borlanmış ve kromlanmış malzemelerin sürtünme katsayılarını (Tablo 1) belirlemişlerdir (Özsoy, 1991).

Tablo 1. Sert krom kaplama ve borlanmış çeliklerin sürtünme katsayıları

Çelik	İşlem uygulandıktan sonraki sürtünme katsayıları	
	Borlanmış	Kromlanmış
XC10	0.57	0.64
XC38	0.55	0.74
Z200C12	0.54	0.75
Z6 CN 18-10	0.50	0.63

Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından diğer bir üstünlüğü, gerek çalışma ortamından kaynaklanan, gerekse kayma sürtünmesi sonucunda ortaya çıkan ısının, borlu tabakaların sertliklerinde ve aşınma dayanımlarında büyük bir düşüşe neden olmamasıdır. Bor yayını uygulanan yüzeylerin aşınma davranışlarını inceleyen araştırmacıların büyük çoğunluğu, tek fazlı (Fe₂B) tabakalarının, çift fazlı (FeB+Fe₂B) tabakalarından daha iyi sonuçlar verdiği konusunda birleşirken, Shadrichev ve diğerleri %10-20 FeB inklüzyonları içeren Fe₂B matriksli yapının aşınma direncinin daha iyi olduğunu ileri sürmektedir (Özsoy, 1991).

Budinski yayınma işlemlerini değişik açılardan karşılaştırmıştır. Tablo 2’de görüldüğü gibi borlama işlemiyle yüksek yüzey sertliği elde edilmektedir (Budinski, 1991).

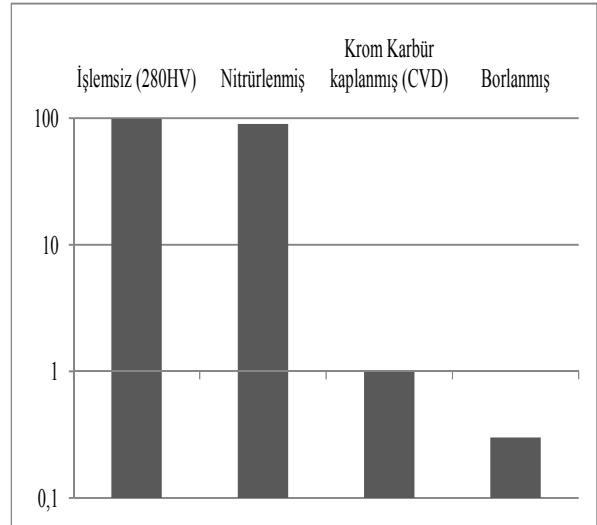
Yapılan çalışmalarda borlama ile erişilen sertliğin abrazif aşınmaya karşı direnci arttırdığı ve Fe₂B’nin aşınmaya karşı direncinin FeB fazına göre 10 kat daha düşük olduğu iddia edilmektedir (Şen ve Yılmaz, 2004).

Borür tabakalarının abrazif aşınma dayanımları, yüksek sertliklerinden dolayı oldukça iyidir. Farklı kaplama teknikleri uygulanmış yüzey-

lerin abrazif aşınma davranışları Şekil 4’te verilmiştir. Borür tabakasının abrazif aşınma açısından üstünlüğü açıkça görülmektedir (Hunger ve True, 1994).

Tablo 2. Yayınma işlemlerine ait bazı özellikler

Yüzey işlemi	Malz.	İşlem sıcaklığı (C°)	Sertlik (HV)	Tabaka kalınlığı (mm)
Karbürleme	4620	800/900	700	225
Nitrürleme	17-4 Çeliği	500/600	800	200-300
Karbonitrürleme	4620	700/900	700	500
Borlama (B1 ve B2)	4620	900/1100	1500	50
TiC	440C	900/1100	3000	75
VC	D2	900/1100	2500	75
FNC	4620	500/600	700	10
Referansa Kaplamalar				
Sert Krom	4620	Oda Sıcak.	900	75
Elek	4620	Oda Sıcak	700	30

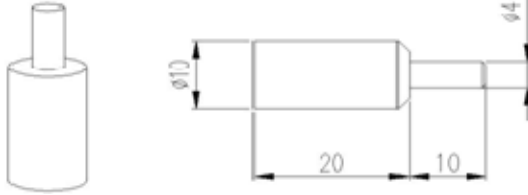


Şekil 4. 42CrMo4 çeliğin taşlama diski testi sonucundaki abrazif aşınma miktarı

Deneysel çalışmalar

Cam şekillendirme makinalarında mevcut kalıp kolu malzemesi olan AISI 420 kalite çeliğe alternatif olarak seçilen işlem görmemiş ve farklı yüzey işlemleri görmüş (borlama, akımsız nikel, sert krom kaplama, nitrokarbürleme); AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite

çeliklerden kalıp kollarındaki gerçek aşınma şartlarını simule edebilecek şekilde tasarlanan aşınma deneyleri için standart numuneler hazırlanmıştır. Bu deneylerde kullanılan standart pim numune Şekil 5'te gösterilmektedir. Metal-metal aşınma deneyi olarak disk üstünde pim deneyi tercih edilmiştir.



Şekil 5. ASTM G 99 standardına göre hazırlanan aşınma deney numunesi

Hazırlanan aşınma deney numunelerine aşağıdaki yüzey işlemleri uygulanmıştır;

Borlama prosesinde Ekobor firmasının hazır tozu kullanılmıştır ve numuneler koruyucu atmosfer olarak argonun kullanıldığı, 950°C'lik bir fırında 4 saat süreyle ısıtılarak borlanmıştır. Bir termo kimyasal difüzyon prosesi olan borlamanın demir, demir dışı ve bağzı süper alaşım gibi geniş bir malzeme üzerinde uygulanması yapılmaktadır (Jain ve Sundararajan, 2002), Genel olarak ticari bor karışımlarında B₄C donör olarak KBF₄ aktivatör olarak ve SiC dengeleyici olarak ortamda bulunurlar (Uslu ve Cömert, 2006).

Nitrokarbürleme işleminde ise, 350°C'ye ısıtılan deney numunelerinin 1 saat süreyle havada oksidasyonu sağlandıktan sonra, 10 saat süreyle 580°C'de nitro karbürizasyonu (N₂+NH₃+CO₂) sağlanmıştır.

Akımsız nikel kaplama işlemi ise, deney numunelerinin 4 saat süreyle 190°C'de gerilimlerinin giderildiği, 1 saat süreyle de 345°C'de hidrojen gevrekliğinin giderildiği ortamda farklı banyolarda yapılmıştır.

Sert krom kaplama işlemi ise, elektrolitik yöntemle kromik asit ve sülfürik asit ortamında yapılmıştır.

Kaplanmış numunelerin sertlik değerleri 200 gr yük ile bir Vickers sertlik cihazında ölçülmüştür.

Aşınma deneyleri, laboratuvar ortamında %50±5 nem oranı ve 20±2°C sıcaklıkta, 5 kg'lık bir yük seçilerek, disk üstünde pim deneyleri olarak gerçekleştirilmiştir.

Pimin üzerinde hareket ettiği disk, M2 kalite çelikten imal edilmiştir. Metal-metal aşınma deneylerinde, Şekil 6'da görüldüğü gibi, deney numuneleri sabit 0.52 m/s kayma hızında dönen bir metal disk üzerine, sabit bir yük altında bastırılmıştır. Deneyler, her seti 2000 m ve toplamda 6000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Aşınan pim deneyi düzeneği

Metal-metal aşınma deneylerinin öncesi ve sonrasında, her numunenin yüksekliği 0.01 mm ve ağırlığı 0.1 mg hassasiyetle ölçülerek numunelerin yükseklik kayıpları (ΔH) ve ağırlık kayıpları (ΔG) 2000 m'lik kayma mesafeleri aralıklarında hesaplanmıştır. Numuneler ve aşındırıcı disk her deney öncesi alkol ile temiz-lenmiş ve kuru sürtünme şartları sağlanmıştır.

Metalografik çalışmalar

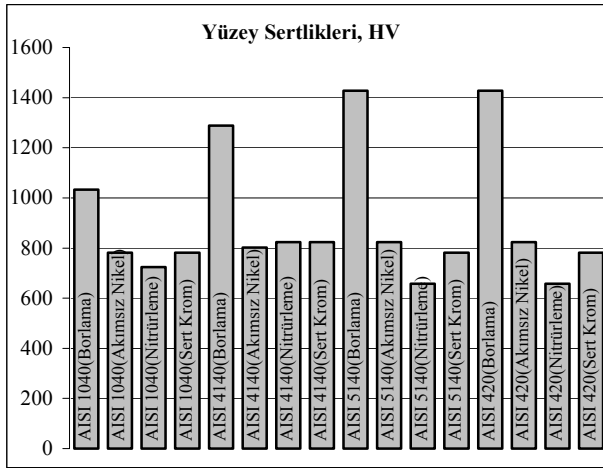
Metalografik incelemeler için reçineye alınan numunelere, önce 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 grid zımparalarla, sonra üzeri keçe kaplı döner disklerle parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatıcı olarak %98'lik Al₂O₃ solüsyonu kullanılmıştır.

Parlatma işleminden sonra optik mikroskopta kesit yüzey görüntüleri alınan numuneler, su ile yıkayıp etil alkol ile iyice temizlendikten sonra,

%3'lük nital ile dağlanarak mikroyapı incelemelerine hazır hale getirilmiştir. Sadece AISI 420 kalite çelik malzeme grubu için (%3'lük nital ile dağlanmadığı için) dağlayıcı olarak %20 HNO₃-%2 HF kullanılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde Diagnostic marka optik mikroskop kullanılarak mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

Deney sonuçları ve irdelenmesi

DeneySEL amaçla seçilen çelik kalıp kolu malzemelerinin kaplama öncesi 170-210 HV arasında olan yüzey sertlikleri; "Akımsız Nikel Kaplama, Nitrokarbürleme ve Sert Krom Kaplama" işlemleri sonrasında ortalama 800 HV değerine ulaşmıştır. Buna karşılık "Borlama" işlemi sonrası çelik türüne bağlı olarak 1110-1495 HV sertlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. AISI 1040-AISI 4140- AISI 420-AISI 5140 kalite çelik malzemelerin kaplama öncesi ve farklı kaplamalar sonrasında elde edilen yüzey sertlikleri

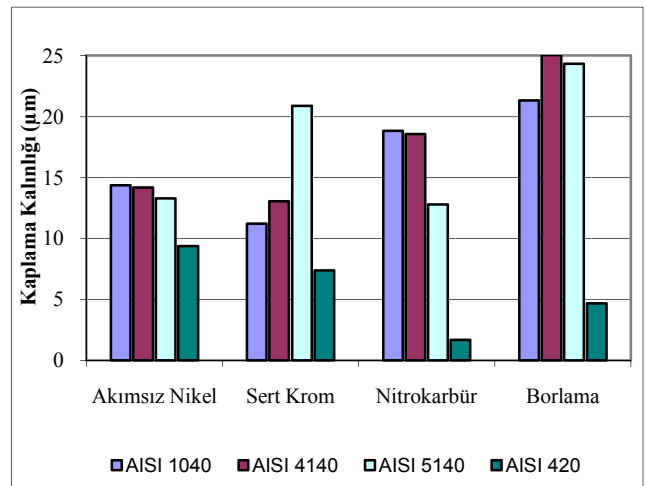
İncelenen çelikler içerisinde kaplamasız durumda en düşük sertlikte olan AISI 1040 kalite çeliktir (170 HV), en sert çelik ise AISI 420 kalite çeliktir (270 HV). Akımsız nikel kaplama sonucunda incelenen tüm çeliklerin sertlikleri yaklaşık değerlerde (800 HV) olmasına rağmen en yüksek sertlik AISI 420 kalite çelikte (832 HV) elde edilmiştir.

Nitrokarbürleme işlemi sonucunda da incelenen tüm çeliklerin sertlikleri birbirine yakın değerlerdedir. Sertlik değerleri detaylı olarak karşılaşt

tırıldığında, nitrokarbürleme durumunda AISI 420 çeliği (685 HV) ile AISI 5140 çeliğinin (725 HV) diğer iki çelikten (800 HV) daha düşük sertlikte olduğu tespit edilmiştir.

Sert krom kaplama sonrasında aynı mertebede sertlik değerlerine ulaşılmasına rağmen, bu kaplama sonrası en yüksek sertlik AISI 4140 kalite çelikte (920 HV), en düşük sertlik ise AISI 420 kalite çelikte (757 HV) elde edilmiştir. Buna karşılık borlama işlemi sonrası çelik türüne bağlı olarak 1110-1495 HVsertlik değerleri elde edilmiştir. Bu durumda en yüksek sertlik AISI 5140 kalite çelikte (1495 HV) elde edilmiştir. Bunu borlanmış AISI 4140 çelik (1324 HV) izlemiştir. AISI 1040 kalite çelik (1116 HV) ile borlanmış AISI 420 kalite çeliklerin (1126 HV) sertlikleri ise aynı mertebede kalmıştır.

Deneylerde kullanılan çeliklerin kaplama kalınlıkları Şekil 8'de verilmiştir. Akımsız nikel ile kaplanmış çelikler incelendiğinde, AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çeliklerin ortalama kaplama kalınlıklarının birbirlerine çok yakın oldukları (14 µm), AISI 420 kalite çeliğin ortalama kaplama kalınlığının ise diğer çeliklere oranla daha az (9 µm) olduğu görülmüştür.

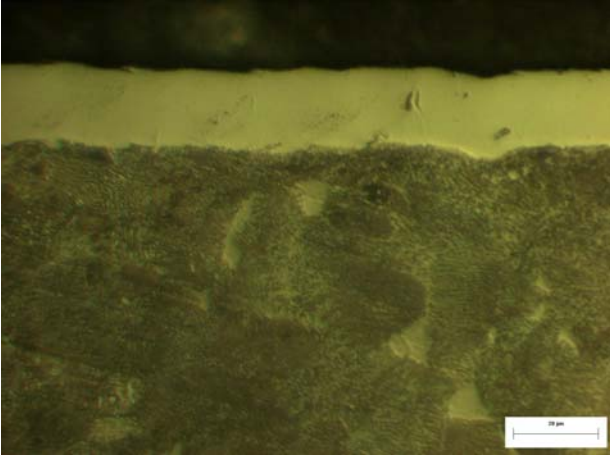


Şekil 8. AISI 1040- AISI 4140- AISI 420- AISI 5140 kalite çelik malzemelerin kaplama kalınlıkları (µm)

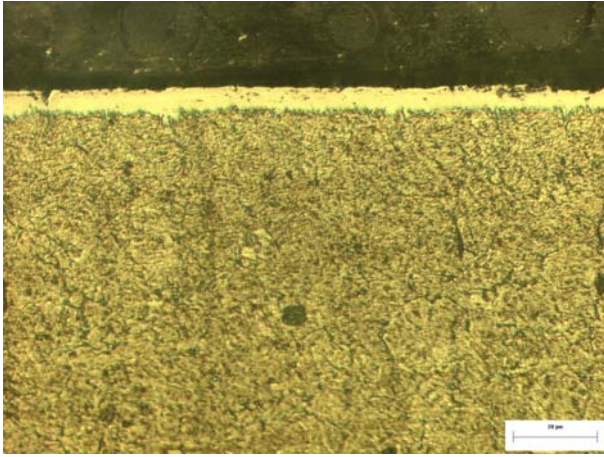
Sert krom kaplama uygulanmış tüm çelikler incelendiğinde, en yüksek ortalama kaplama kalınlığının AISI 5140 kalite çelikte (20 µm) ol

duğu, AISI 420 kalite çeliğin ise ortalama 7 μm kaplama kalınlığı ile en ince kaplamaya sahip olduğu belirlenmiştir.

Optik mikroskoptan elde edilen kesit yapıları karşılaştırıldığında, AISI 5140 kalite çeliğin kaplamasının homojen (şekil 9) ve AISI 420 kalite çeliğe (şekil 10) kıyasla kaplamasının çok daha kalın olduğu açıkça görölmektedir.



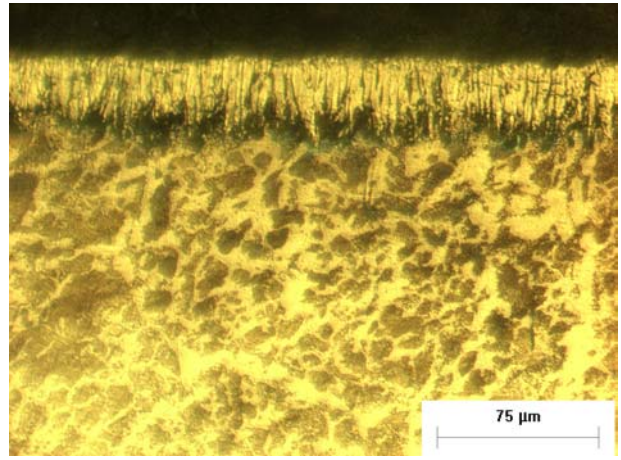
şekil 9. AISI 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x



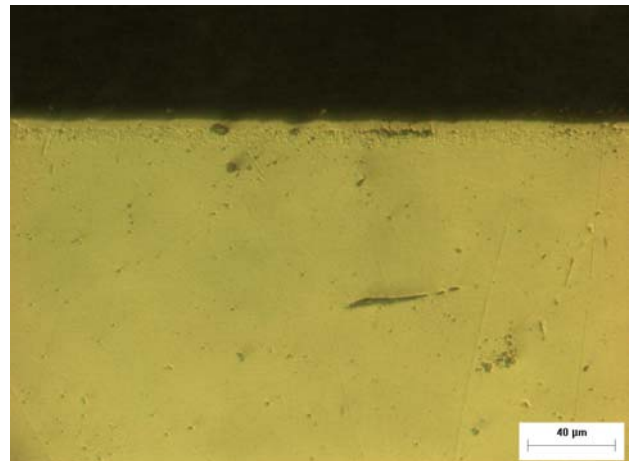
şekil 10. AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x

Nitrokarbürleme yüzey işlemi uygulanmış çelikler incelendiğinde, AISI 1040 ve AISI 4140 kalite çeliklerin diğer çeliklerden daha yüksek ortalama kaplama kalınlıklarına sahip oldukları (18 μm), AISI 420 kalite çeliğin ise çok ince bir nitrokarbür tabakasına (1.7 μm) sahip olduğu tespit edilmiştir.

Borlama işlemi sonunda da, 4.6 μm ortalama kaplama kalınlığına sahip AISI 420 kalite çelik dışında borlanmış AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çeliklerin en yüksek ortalama kaplama kalınlıklarına (>21 μm) ulaştıkları görölmüştür. Optik mikroskoptan alınan kesit görüntüleri incelediğinde, borlanmış AISI 1040 kalite çeliğin kesit görüntüsünde kolonsal ve dişli bor tabakası kolaylıkla görölebildiği halde (şekil 11), borlanmış en ince tabaka kalınlığına sahip AISI 420 kalite çelikte bu dişli yapı görölmemektedir (şekil 12).



şekil 11. AISI 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x

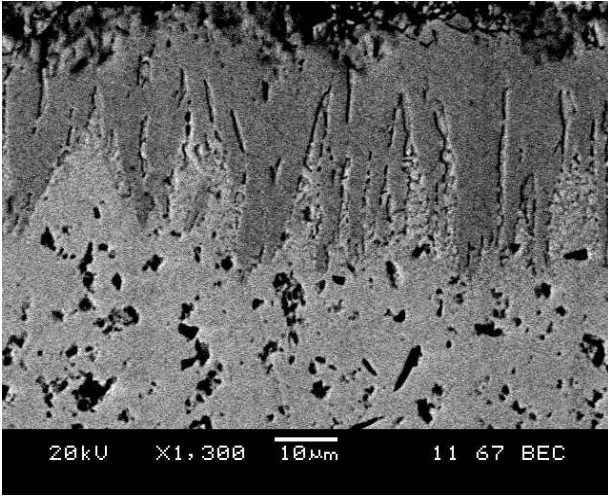


şekil 12. AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü-400x

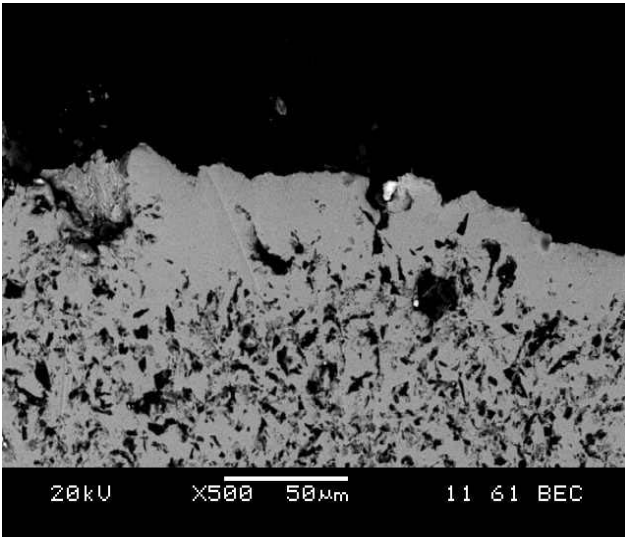
Metalografik incelemeler için hazırlanan numunelerle yapılan mikroyapı incelemelerinde kaplama katmanları ölçölmüştür. Borlama yapılmış

numunelerin kesitleri ayrıca taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir (Şekil 13, 14).

Taramalı elektron mikroskopunda kesitten alınan görüntülerde AISI 1040, AISI 4140, ve AISI 5140 kalite çelik malzemelerin Ekabor II ile borlanması sonucunda kolonsal ve dişli bor tabakasının oluştuğu (Şekil 13), AISI 420 kalite çelik malzemesinin borlanması sonucunda ise kolonsal olmayan bir bor tabakası oluştuğu görülmüştür (Şekil 14).



Şekil 13. AISI 1040 borlanmış malzemenin taramalı elektron mikroskopu kesit görüntüsü

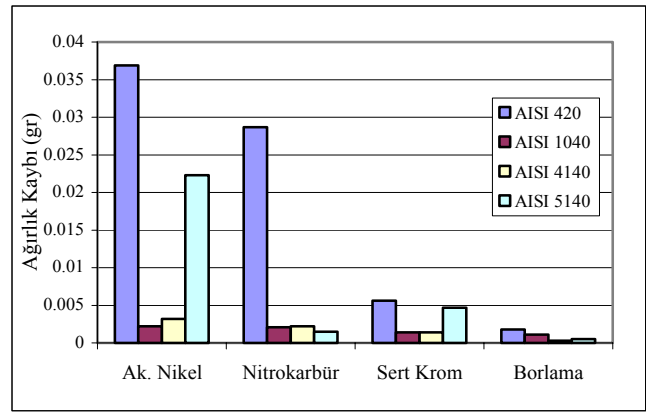


Şekil 14. AISI 420 borlanmış malzemenin taramalı elektron mikroskopu görüntüsü

Metal-metal aşınma deneyinde pimin üzerinde hareket ettiği disk, M2 kalite çelikten imal

edilmiştir ve toplam kayma mesafesi 6000 m olarak belirlenmiştir.

Aşınma deneylerinde kayma mesafesi 2000 m iken kaplamaların genel olarak yüzeyden ayrıldığı ve aşınmada kaplama içerisinde kalındığı için, karşılaştırma yapılırken bütün deneyler için 2000 m'ye karşılık gelen ağırlık kayıpları dikkate alınmıştır. Şekil 15'te 2000 m'deki ağırlık kaybı değerleri gösterilmiştir. Kaplama türleri içerisinde incelenen dört kalite çelik için en az ağırlık kaybı borlanmış durumda elde edilmiştir.

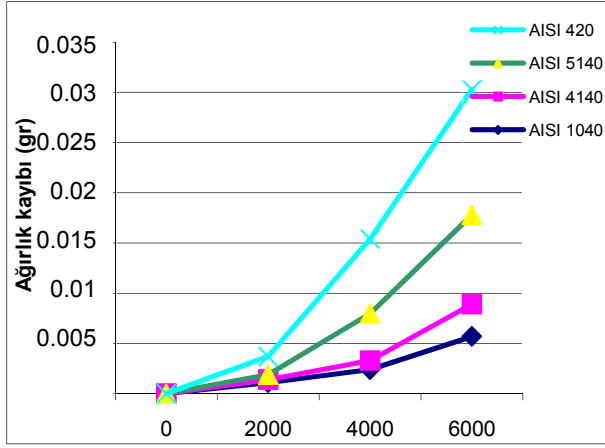


Şekil 15. AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140- AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama türlerine göre 2000 m kayma mesafesinde gösterdikleri ağırlık kaybı değerleri

Şekil 16'da ise borlanmış farklı çelik numunelerin kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. AISI 4140 kalite borlanmış çelik aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. AISI 420 kalite çeliğin diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençli olduğu ve 2000 m sonrasında hızlanarak ağırlık kaybettiği görülmektedir. Bu durumun başlıca sebebi, borlanmış AISI 420 kalite çelik deney numunesinin kaplama kalınlığının diğer deney numunelerinin ortalama kalınlığının %25'i kadar olmasıdır. Fakat ilk 2000 m'deki aşınma davranışı incelendiğinde, borlamanın en iyi netice veren yüzey kaplama yöntemi olduğu açıkça görülmektedir.

Aşınma deney sonuçları, aşınmaya karşı en dirençli deney numunesi referans alınarak, diğer

numunelerin ağırlık kaybının aşınmaya en dirençli olan numunenin ağırlık kaybına oranı olan rölatif aşınma oranı (RAO) hesaplanarak irdelenmiştir.



Şekil 16. Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr) grafiği

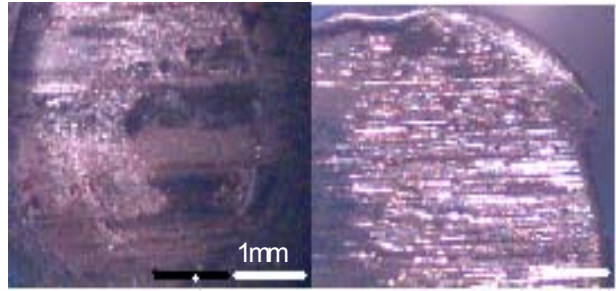
Metal-metal aşınma deneyleri için rölatif aşınma oranları, deney numunelerinin ağırlık kaybı değerlerinden ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bunun sonucunda 2000 m kayma mesafesindeki ağırlık kaybı olarak aşınma değerleri ise; AISI 420 kalite çelikte kaplamasız iken 0.0552 gr, sert krom kaplı iken 0.0056 gr olurken, bor kaplı AISI 4140 çeliğinde sadece 0.003 gr değerinde olmuştur. Borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin aşınma oranı referans alınarak, diğer deney numunelerinin RAO değerleri mukayese edildiğinde, borlanmış AISI 4140 kalite çelik deney numunesinin mevcut durumda kullanılan AISI 420 kalite çeliğin sert krom kaplı durumuna kıyasla 18.67 kat, kaplamasız durumuna kıyasla 184 kat daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3).

Şekil 17'de disk üstünde pim aşınması deneyi sonucunda rölatif aşınma oranına göre 2000 m'de aşınma yüzeylerinden en çok aşınan AISI 420 kaplamasız ve en az aşınan AISI 4140 borlanmış pim numunelerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Numunelerin yüzey görünüşleri ağırlık kaybı verilerini desteklemektedir.

Tablo 3. Aşınma deneylerinde 2.000 m kayma mesafesinde incelenen dört farklı kalite çeliğin farklı türdeki kaplanmış durumlarında ağırlık kaybı değerlerinden hesaplanan rölatif aşınma oranı (RAO)değerleri

Kaplama Türü	Deney numunesi ağırlık kaybı değerleri (gr)			
	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
Kaplamasız	0.0214	0.0301	0.0192	0.0552
Ak. Nikel	0.0022	0.0032	0.0223	0.0369
Nitokarürleme	0.0021	0.0022	0.0015	0.0287
Sert Krom	0.0014	0.0014	0.0047	0.0056
Borlama	0.0011	0.0003	0.0005	0.0018

Kaplama Türü	Borlanmış AISI 4140 numuneye göre RAO			
	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
Kaplamasız	71.33	100.33	64	184
Ak. Nikel	7.33	10.67	74.33	123
Nitokarürleme	7	7.33	5	95.67
Sert Krom	4.67	4.67	15.67	18.67
Borlama	3.67	1	1.67	6



a) AISI 4140 Borlanmış b) AISI 420 Kaplamasız

Şekil 17. RAO'na göre en çok aşınan AISI 420 kaplamasız (a) ve en az aşınan AISI 4140 borlanmış (b) pim numunelerinin stereo mikroskop görüntüleri (60x)

Genel sonuçlar

Cam makinelerinde kalıp kolu mevcut malzemesine (AISI 420) alternatif olan malzeme (AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140) ve kaplama türlerinin (akımsız nikel, sert krom, nitrokarbürleme ve borlama) denendiği bu çalışmada, dört farklı taban malzemesinin dört farklı yüzey kaplama işlemi görmüş ve kaplanmamış durumlarındaki malzeme karakterizasyonu ve aşınma davranışı incelenerek elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Deneysel amaçla seçilen çelik kalıp kolu malzemelerinin kaplama öncesi 170-210 HV arasında olan yüzey sertlikleri; "Akımsız Nikel Kaplama, Nitrokarbürleme ve Sert Krom Kaplama" işlemleri sonrasında ortalama 800 HV_{0.2} değerine ulaşmıştır. Buna karşılık "Borlama" işlemi sonrası çelik türüne bağlı olarak 1110-1495 HV sertlik değerleri elde edilmiştir
2. Deney numunelerinin kaplama öncesi ve sonrası sertlik değerlerinden AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çeliklerin yüzey kaplama işlemi sonrasında en fazla sertleşen deney numuneleri oldukları görülmüştür.
3. Aynı koşullarda yapılan tüm kaplama işlemlerinde en düşük kaplama kalınlığı AISI 420 kalite çelikte elde edilmiştir. AISI 420 kalite çelik dışında diğer 3 çelikte en yüksek kaplama kalınlıkları borlama işleminde elde edilmiştir.
4. AISI 420 deney numunelerinin genel olarak en düşük kaplama kalınlığına sahip oldukları, yüzey sertliklerinin ise diğer deney numunelerine göre kaplama kalınlığı nispetinde düşük oranlarda olmadığı tespit edilmiştir.
5. Taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) yapılan incelemelerde AISI 1040 ve AISI 4140 deney numunelerinde borlanmış yüzeylerin kolonsal ve dişli bir yapısının olduğu görülmüştür.
6. Genel olarak ağırlık kayıpları incelendiğinde, borlanmış deney numunelerinin en az ağırlık kaybına uğrayan deney numuneleri oldukları ortaya çıkmış, dolayısıyla çalışmada öne çıkan yüzey kaplama türü "borlama" olmuştur.
7. 2000 m kayma mesafesinde en az ağırlık kaybeden deney numunesi AISI 4140 borlanmış deney numunesi olmuştur. Bu numunenin diğer bir özelliği, 1400 HV değerinde yüksek bir yüzey sertliğine ve 24 µm bir kaplama kalınlığına sahip olmasıdır.
8. Disk üstünde pim aşınma deneyinde sert krom kaplamaların, borlamadan sonra en verimli neticeleri veren yüzey kaplama türü olduğu tespit edilmiştir.
9. Borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin ağırlık kaybı referans alınarak diğer deney numunelerinin RAO değerleri karşılaştırıldığında, borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin mevcut

durumda kullanılan AISI 420 kalite çeliğin sert krom kaplı durumuna kıyasla yaklaşık 19 kat, kaplamasız durumuna kıyasla 184 kat daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- Budinski, K.G., (1991). Friction in machine design, in tribological modelling of mechanical designers, *ASTM*, Philadelphia, USA, 89-126.
- Celis, J.P., (1995). A systems approach to the tribological testing of coated materials, *Surface and Coatings Technology*, **74/75**, 15-22.
- Campos, I., Oseguera, J., Figueora, U., Garcia, J.A., Bautista, O., Kelemenis, G., (2003). Kinetic study of boron in the past-boriding process, *Materials Science and Engineering: A*, **352**, 261-266.
- Eyre, T.S., (1978). *Wear characteristic of metals*, in sourcebook on *Wear*, Control Technology, 1-11.
- Genel, K., Özbek, I., Kurt, A., Bindal, C., (2002). *Surface Coating Technoogy*, **160**, 38-43.
- Genel, K., Özbek, I., Bindal, C., (2003). *Materials Science and Engineering: A*, **347**.
- Geoeriot, P., Thevenot, F., Driver, J.H., Magnin, T., (1983). *Methods for examining brittle layers obtained by a boriding surface treatment (Borudif)*, *Wear*, 86.
- Holmberg, K. ve Matthews, A., (1994). *Coatings Tribology- Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Elsevier, **28**, 3-13, 33-121, 125, 257-307.
- Hunger, H.J. ve True, G., (1994). Boronizing to produce wear-resistant surface layers, *Heat treatment of Metals*, **2**, 31-39.
- Hutchings, I.M., (1992). *Tribology: Friction and engineering materials*, Edward Arnold, London.
- Jain, V. ve Sundararajan, G., (2002). Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel, *Surface Coating Technology*, **149**, 1, 21-26.
- Matuschka, A.G., (1980). *Boronizing*, Carl Hanser Verlag, München Wien., Heyden & Son Inc.
- Novakova, A.A. ve Sizov, I.G., (2004). *Electron-beam boriding of low-carbon steel*, **383**.
- Özbek, Ü., (1988). Akımsız nikel kaplamalar, *Lisans Bitirme Tezi*, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- Özsoy, A., (1991). Çeliğin borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriks özelliklerinin iyileştirilmesi, *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

- Şen, U., (1997). Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şen, S., Şen, U., Bindal, C., (2005). An approach to kinetic study of boronized steels, *Surface Coating Technology*, **191**, 2-3, 274-285.
- Şen, U., Şen, S., Yılmaz, F., (2004). Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons, *Surface and Coatings Technology*, **176**, 2, 222-228.
- Sinha, A.K., (1991). Boriding (Boronizing), ASM Handbook, 437- 447, Volume 4, J. Heat Treating.
- Uslu, I., Cömert, H., İpek, M., Çelebi, F.G., Özdemir, O., Bindal, C., (2007). A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels, *Materials and Design*, **28**, 1819-1826.