

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 1010 VE AISI 1040 ÇELİKLERİNE NİKEL VE KROM  
YAYINDIRILARAK YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisi Caner ALTAKAN**

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nurhan CANSEVER (YTÜ)**

**İSTANBUL, 2011**

## İÇİNDEKİLER

|                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                        | v     |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                         | vii   |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                      | viii  |
| ÖNSÖZ .....                                                | xi    |
| ÖZET .....                                                 | xii   |
| ABSTRACT .....                                             | xiii  |
| 1. GİRİŞ .....                                             | 1     |
| 2. YÜZEY İŞLEMLERİ .....                                   | 5     |
| 3. ÇELİKLER.....                                           | 8     |
| 3.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması ..... | 9     |
| 3.1.1 Düşük Karbonlu Çelikler .....                        | 9     |
| 3.1.2 Orta Karbonlu Çelikler .....                         | 9     |
| 3.1.1 Yüksek Karbonlu Çelikler.....                        | 10    |
| 3.2 Alaşım Elementlerinin Çeliklere Etkisi .....           | 11    |
| 3.2.1 Karbon.....                                          | 12    |
| 3.2.2 Silisyum .....                                       | 13    |
| 3.2.3 Mangan.....                                          | 13    |
| 3.2.4 Fosfor .....                                         | 13    |
| 3.2.5 Kükürt .....                                         | 13    |
| 3.2.6 Oksijen .....                                        | 14    |
| 3.2.7 Bakır.....                                           | 14    |
| 3.2.8 Krom .....                                           | 14    |
| 3.2.9 Nikel.....                                           | 15    |
| 3.2.10 Volfram .....                                       | 16    |
| 3.2.11 Molibden .....                                      | 17    |
| 3.2.12 Vanadyum .....                                      | 17    |
| 3.2.13 Kobalt.....                                         | 17    |
| 3.2.14 Alüminyum.....                                      | 17    |
| 3.3 Uluslar Arası Çelik Standartları .....                 | 17    |
| 3.3.1 Türk Standartları Enstitüsü (TSE) Standartları ..... | 18    |
| 3.3.2 DIN Alman Endüstrisi Çelik Standartları .....        | 18    |
| 2.2 AISI/SAE Standartları .....                            | 19    |
| 4. DİFÜZYON .....                                          | 22    |

|         |                                                    |    |
|---------|----------------------------------------------------|----|
| 4.1     | Difüzyon Mekanizmaları .....                       | 22 |
| 4.1.1   | Arayer Difüzyonu Mekanizması .....                 | 24 |
| 4.1.2   | Yeralan Difüzyonu Mekanizması .....                | 26 |
| 4.1.3   | Boşluk Mekanizması.....                            | 27 |
| 4.1.4   | Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması .....        | 27 |
| 4.1.5   | Halka Mekanizması .....                            | 28 |
| 4.2     | Aktivasyon Enerjisi.....                           | 28 |
| 4.3     | Kararlı Hal Difüzyonu(1.Fick Kanunu) .....         | 29 |
| 4.4     | Kararlı Hal Difüzyonu(1.Fick Kanunu) .....         | 30 |
| 4.5     | Difüzyonu Etkileyen Faktörler .....                | 32 |
| 4.5.1   | Sıcaklık.....                                      | 32 |
| 4.5.2   | Bileşim .....                                      | 33 |
| 4.5.3   | Kristal Yapısı.....                                | 34 |
| 4.5.4   | Alaşım Elementleri .....                           | 34 |
| 4.5.5   | Tane Boyutu .....                                  | 34 |
| 5.      | DİFÜZYON İLE YAPILAN YÜZEY İŞLEMLERİ.....          | 36 |
| 5.1     | Giriş .....                                        | 36 |
| 5.2     | Ametallerle Termokimyasal İşlemler .....           | 37 |
| 5.2.1   | Karbürleme .....                                   | 37 |
| 5.2.2   | Karbonitrürleme.....                               | 38 |
| 5.2.3   | Nitrürleme .....                                   | 39 |
| 5.2.4   | Nitrokarbürleme.....                               | 40 |
| 5.2.5   | Borlama .....                                      | 43 |
| 5.2.5.1 | Borlamanın Üstünlükleri.....                       | 44 |
| 5.2.5.2 | Borlamanın Kısıtlamaları .....                     | 45 |
| 5.3     | Metallerle Termokimyasal İşlemler.....             | 46 |
| 5.3.1   | Silisyumlama .....                                 | 46 |
| 5.3.2   | Kromlama.....                                      | 47 |
| 5.3.3   | Alüminyumlama .....                                | 47 |
| 6.      | DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                          | 49 |
| 6.1     | Giriş .....                                        | 49 |
| 6.2     | Deneylerde Kullanılan Numuneler .....              | 49 |
| 6.3     | Numunelerin Elektrolitik Kaplanması .....          | 50 |
| 6.4     | Numunelerin Isıl İşlemi .....                      | 51 |
| 6.5     | Numunelerin Karakterizasyonu .....                 | 51 |
| 6.5.1   | Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri..... | 51 |
| 6.5.2   | Korozyon Deneyleri.....                            | 65 |
| 6.5.3   | Mikrosertlik Ölçümleri .....                       | 72 |
| 7.      | SONUÇLAR .....                                     | 74 |
|         | KAYNAKLAR.....                                     | 75 |

|               |    |
|---------------|----|
| ÖZGEÇMİŞ..... | 79 |
|---------------|----|

## SİMGE LİSTESİ

|                  |                                                                      |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| SEM              | Taramalı Elektron Mikroskobu                                         |
| EDS              | Enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi                           |
| D                | Difüzyon katsayısı                                                   |
| dc/dx            | Yoğunlaşma gratyantıdır                                              |
| J                | Akı veya akış                                                        |
| x                | Difüzyon mesafesi                                                    |
| Cx               | Yüzeyden veya ara kesitten x kadar mesafedeki bir noktanın yoğunluğu |
| Co               | Difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu                             |
| T                | Difüzyon süresi                                                      |
| AISI             | Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü                                    |
| SAE              | Otomotiv Mühendisleri Birliği                                        |
| E <sub>kor</sub> | Korozyon Potansiyeli                                                 |

## ŞEKİL LİSTESİ

|           |                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 | Çeliğin atmosferik korozyonuna nikelin etkisi .....                                                                                                                                                                                                       | 3  |
| Şekil 1.2 | Çeliğin deniz suyundaki korozyonuna krom miktarının etkisi .....                                                                                                                                                                                          | 3  |
| Şekil 2.1 | Yüzey kaplama teknikleriyle elde edilen kaplamaların a) tipik kalınlık aralığı ve b) işlem sıcaklıkları .....                                                                                                                                             | 6  |
| Şekil 3.1 | Fe-C denge diyagramı.....                                                                                                                                                                                                                                 | 8  |
| Şekil 3.2 | Karbonlu çeliklerde değişik alaşım elementlerinin alt akma noktasına etkisi .....                                                                                                                                                                         | 11 |
| Şekil 3.3 | Çeliklerde karbon oranına bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....                                                                                                                                                                            | 12 |
| Şekil 3.4 | Karbonun çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi .....                                                                                                                                                                                                    | 12 |
| Şekil 3.5 | Düşük karbonlu çeliklerde krom miktarının çekme dayanımına etkisi .....                                                                                                                                                                                   | 14 |
| Şekil 3.6 | Fe-Cr denge diyagramı .....                                                                                                                                                                                                                               | 15 |
| Şekil 3.7 | Fe-Ni denge diyagramı .....                                                                                                                                                                                                                               | 16 |
| Şekil 4.1 | a) Yüksek sıcaklık ısıtıl işlemi görmeden önce Cu-Ni difüzyon çifti, b) Difüzyon çiftindeki Cu (renkli halkalar) ve Ni (gri halkalar) atom yerlerinin şematik olarak gösterimleri, c) Bakır ve nikelin difüzyon çifti içindeki bileşimlerinin değişimi .  | 23 |
| Şekil 4.2 | a) Yüksek sıcaklık ısıtıl işlemi gördükten sonra Cu-Ni difüzyon çifti, b) Difüzyon çiftindeki Cu (renkli halkalar) ve Ni (gri halkalar) atom yerlerinin şematik olarak gösterimleri , c) Bakır ve nikelin difüzyon çifti içindeki bileşimlerinin değişimi | 24 |
| Şekil 4.3 | Arayer difüzyonun oluşumunun şematik olarak gösterilmesi.....                                                                                                                                                                                             | 25 |
| Şekil 4.4 | YMK Kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi .....                                                                                                                                                                                                 | 27 |
| Şekil 4.5 | Kristal kafeste atomların hareket mekanizmaları.....                                                                                                                                                                                                      | 28 |
| Şekil 4.6 | Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q) değişimi..                                                                                                                                                                          | 29 |
| Şekil 4.7 | Kararsız hal difüzyonu için bileşim profili .....                                                                                                                                                                                                         | 31 |
| Şekil 4.8 | Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan bileşim profili .....                                                                                                                                                                               | 31 |
| Şekil 4.9 | 927°C'de demir içinde difüze olan karbon için difüzyon katsayısının konsantrasyonla değişimi.....                                                                                                                                                         | 33 |
| Şekil 5.1 | Isıl ve Kimyasal Yüzey İşlemlerinin Sınıflandırılması .....                                                                                                                                                                                               | 37 |
| Şekil 5.2 | Bir AISI 8620 çeliğinden imal edilmiş olan otomobil dişlisinin karbürleşmiş ve havada soğutulmuş mikroyapı görüntüsü .....                                                                                                                                | 38 |
| Şekil 5.3 | Karbonitürleşmiş ve yağda soğutulmuş AISI 1020 çeliğinin mikroyapı görüntüsü                                                                                                                                                                              | 39 |
| Şekil 5.4 | 570 °C'de 3 saat sıvı ortamda nitrürlenmiş ve su verilmiş küresel grafitli dökme demirin mikroyapı görüntüsü .....                                                                                                                                        | 40 |

|            |                                                                                                                                                                              |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 5.5  | 570 °C’de 8 saat gaz ortamında nitrokarbürleşmiş C60W çeliğinin SEM görüntüsü<br>.....41                                                                                     |
| Şekil 5.6  | Çelik yüzeyinde borlama ile FeB ve Fe <sub>2</sub> B borür tabakalarının SEM görüntüsü...44                                                                                  |
| Şekil 5.7  | Alüminyumlanmış ve kaplanmamış 9Cr-1Mo çeliğinin korozyon hızlarının karşılaştırılması ..... 48                                                                              |
| Şekil 6.1  | Çeliklerin mikroyapı görüntüleri a) AISI 1010 çeliği b) AISI 1040 çeliği ..... 50                                                                                            |
| Şekil 6.2  | Çelik yüzeylerine elektrolitik kaplanan nikel ve krom kaplamalarının SEM görüntüsü<br>a) nikel kaplama b) krom kaplama ..... 50                                              |
| Şekil 6.3  | Protherm marka tüp fırını..... 51                                                                                                                                            |
| Şekil 6.4  | Metkon Micracut 150 Marka Hassas Kesme Cihazı ..... 52                                                                                                                       |
| Şekil 6.5  | 800 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü..... 53                                                                                                      |
| Şekil .6.6 | 700 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü..... 53                                                                                                      |
| Şekil 6.7  | 800 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü..... 54                                                                                                      |
| Şekil 6.8  | 700 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü..... 54                                                                                                      |
| Şekil 6.9  | 800 °C’de krom yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü ..... 55                                                                                                      |
| Şekil 6.10 | 700 °C’de krom yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü ..... 55                                                                                                      |
| Şekil 6.11 | 800 °C’de krom yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü ..... 56                                                                                                      |
| Şekil 6.12 | 700 °C’de krom yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü ..... 56                                                                                                      |
| Şekil 6.13 | Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1010 Çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtıl işlem görmüş halinin a) 2 no’lu b) 3 no’lu c) 4 no’lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri ..... 57 |
| Şekil 6.14 | Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1010 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıtıl işlem görmüş halinin a) 3 no’lu b) 5 no’ lu c) 7 no’ lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri.... 58 |
| Şekil 6.15 | Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtıl işlem görmüş halinin a) 1 no’lu b) 2 no’lu c) 3 no’lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri ..... 59 |
| Şekil 6.16 | Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıtıl işlem görmüş halinin a) 8 no’ lu b) 6 no ‘lu c) 4 no’lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri ... 60 |
| Şekil 6.17 | Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtıl işlem görmüş halinin a) 1 no’lu b) 3 no’lu c) 5 no’lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri<br>61     |
| Şekil 6.18 | Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıtıl işlem görmüş halinin a) 1 no’lu b) 4 no’lu c) 5 no’lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri<br>62     |

|            |                                                                                                                                                                    |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.19 | Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtım görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri ..... | 63 |
| Şekil 6.20 | Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıtım görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri ..... | 64 |
| Şekil 6.21 | Princeton Applied Research Parstat 2253 marka korozyon cihazı .....                                                                                                | 65 |
| Şekil 6.22 | Korozyon deney düzeneği.....                                                                                                                                       | 66 |
| Şekil 6.23 | % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....                                            | 66 |
| Şekil 6.24 | % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....                                            | 67 |
| Şekil 6.25 | % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1010 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....                                            | 68 |
| Şekil 6.26 | % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1010 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....                                            | 68 |
| Şekil 6.27 | % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....                                            | 69 |
| Şekil 6.28 | % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....                                            | 69 |
| Şekil 6.29 | Bütün numunelerin korozyon potansiyellerinin karşılaştırılması .....                                                                                               | 71 |
| Şekil 6.30 | Korozyon deneyinden sonra çeliğin yüzey görüntüsü.....                                                                                                             | 71 |
| Şekil 6.31 | Bulut Makine HVS-1000 marka mikrosertlik ölçüm cihazı .....                                                                                                        | 72 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|             |                                                                                                                                                                                      |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 1.1 | Metalik Korozyonun Amerika Birleşik Devletlerine Maliyeti .....                                                                                                                      | 2  |
| Çizelge 1.2 | Nikel ve krom oranının çeliklerin korozyon direncine etkisi .....                                                                                                                    | 3  |
| Çizelge 2.1 | Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması .....                                                                                                                                           | 5  |
| Çizelge 3.1 | Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları .....                                                                                                                          | 9  |
| Çizelge 3.2 | Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.....                                                                                                                            | 10 |
| Çizelge 3.3 | Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.....                                                                                                                          | 10 |
| Çizelge 3.4 | SAE / AISI standartına göre çelik türleri .....                                                                                                                                      | 19 |
| Çizelge 3.5 | AISI 1010 çeliğinin kimyasal bileşimi.....                                                                                                                                           | 20 |
| Çizelge 3.6 | AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri .....                                                                                                                  | 20 |
| Çizelge 3.7 | AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi.....                                                                                                                                           | 21 |
| Çizelge 3.8 | AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri .....                                                                                                                  | 21 |
| Çizelge 4.1 | Bazı malzemelerde, difüzyon hızının sıcaklıkla değişimi.....                                                                                                                         | 32 |
| Çizelge 5.1 | Difüzyon işlemlerinin tipik karakteristikleri .....                                                                                                                                  | 41 |
| Çizelge 6.1 | AISI 1010 ve AISI 1040 Çeliklerinin Kimyasal Analizleri .....                                                                                                                        | 49 |
| Çizelge 6.3 | Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1010 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıtılma işlemi görmüş halinin a) 3 no'lu b) 5 no' lu c) 7 no' lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri ..... | 58 |
| Çizelge 6.4 | Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtılma işlemi görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 3 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri .....   | 59 |
| Çizelge 6.5 | Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıtılma işlemi görmüş halinin a) 8 no' lu b) 6 no 'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış kimyasal analizleri .....  | 60 |
| Çizelge 6.6 | Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtılma işlemi görmüş halinin a) 1 no'lu b) 3 no'lu c) 5 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri .....    | 61 |
| Çizelge 6.7 | Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıtılma işlemi görmüş halinin a) 1 no'lu b) 4 no'lu c) 5 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri .....    | 62 |
| Çizelge 6.8 | Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtılma işlemi görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri .....    |    |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| .....                                                                                                                                                                                      | 63 |
| Çizelge 6.9 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıtım işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri ..... | 64 |
| Çizelge 6.10 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde malzemelerin $E_{kor}$ değerleri.....                                                                                   | 70 |
| Çizelge 6.11 Malzemelerin mikrosertlik değerleri.....                                                                                                                                      | 72 |

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma boyunca her türlü yardım ve desteği ile beni gayretlendiren, fikir, bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan ve yol gösteren hocam Sayın Prof. Dr. Nurhan CANSEVER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Taramalı elektron mikroskobu deneylerinde yardımını esirgemeyen hocam Sayın Prof.Dr. Ahmet TOPUZ'a çok teşekkür ederim. Bütün deney çalışmalarında ve özellikle korozyon deneylerinde yardımını esirgemeyen, fikirleriyle destek olan, yardımlarını hiç unutmayacağım hocam Sayın Araş.Gör. Murat DANIŞMAN' a teşekkürü bir borç bilirim. Metalografik incelemelerde ve taramalı elektron mikroskobu analizlerinde bana yardımcı olan teknisyenler Mehmet ÇALIŞKAN'a ve Şevki ŞAHİN'e, yüksek lisans eğitimim boyunca bir parçası olduğum Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinin çok değerli öğretim üyelerine, araştırma görevlilerine ve teknisyenlerine ve numunelerin krom ve nikel kaplanmasında yardımcı olan Ersan Galvano ve Kimya San. Tic. Ltd. Şti ve Yeni Yıldız Kromaj şirketlerine de teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam Can İsmail ALTAKAN ve annem Gülizar ALTAKAN başta olmak üzere bütün aileme; kardeşime, annaneme, dayılarıma; bütün arkadaşlarıma, kardeşlerime ve yanımda olmasa da sevgisini her zaman içimde hissettiğim rahmetli dedeme teşekkür ederim.

## ÖZET

Bu çalışmada AISI 1010 ve AISI 1040 çelikleri yüzeylerine elektrolitik olarak nikel ve krom kaplanmış, kaplanan çeliklere farklı sıcaklıklarda (700 °C ve 800 °C) ısıtılma işlemi uygulanmak suretiyle nikelin ve kromun çeliklerde yayılması sağlanmış, böylece AISI 1010 ve AISI 1040 çelik yüzeylerinde nikel ve krom miktarı artırılarak adeta alaşımlı çelik gibi davranmaları amaçlanmıştır. Isıl işlem sonrası yüzeylerine nikel ve krom yayındırılan çeliklerin karakterizasyonu yapılmıştır. Difüzyon bölgesi taramalı elektron mikroskopunda(SEM) incelenmiş ve difüzyon bölgesinde EDS analizi yapılmış, kalınlığı ölçülmüş, difüzyon bölgesinin korozyon davranışları incelenmiş ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır.

Nikelin yayındırmayla çeliklerde korozyon direncini arttığı, krom yayındırılmasıyla hem korozyon direncinin hem de sertliğin arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler :** AISI 1010, AISI 1040, Difüzyon, Korozyon, Yüzey İşlem

## **ABSTRACT**

In this work, AISI 1010 and AISI 1040 steels were electroplated with nickel and chromium, heat treatment (700 °C ve 800 °C ) was applied for diffusing nickel and chromium into steels to produce a nickel and chromium enriched surface. And it was aimed that AISI 1010 and AISI 1040 steels treated as alloyed steels. After heat treatment, the diffusion zone was examined with SEM, EDS analyses were done and the diffusion layer's thicknesses were measured. Also corrosion and microhardness experiments were carried out.

It was seen that while nickel diffusing into steel enhanced the corrosion resistance, chromium diffusing into steel enhanced both the corrosion resistance and microhardness.

**Keywords :** AISI 1010, AISI 1040, Diffusion, Corrosion, Surface Treatment

## 1. GİRİŞ

Aşınma ve korozyondan dolayı dünyada her yıl önemli kayıplar olmaktadır. Genel maliyet ve korozyonun kaçınılmaz çevresel problemleri mühendislerin korozyona karşı savaşlarında ana mücadele sebebi olmuştur. Yüzey mühendisliği, bu problemlere çözüm üretmek için 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 geliştirilmektedir(Yılmaz, 2008).

Sürtünerek çalışan makine elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Malzeme dizaynında, korozyon ve aşınma gibi özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekir(Potgieter vd.,2008; Yılmaz,2008). Batelle Columbus Laboratuvarlarının ve Standartlar ve Teknoloji Ulusal Enstitüsünün (NIST) 1995 yılında yaptığı araştırmaya göre metal korozyonunun Amerika Birleşik Devletlerinin ekonomisine yıllık 300 milyar dolar zararı olduğunu ortaya koymuştur. Çizelge 1.1’de Amerika Birleşik Devletlerinin 1975 ve 1995 yıllarına ait metalik korozyon kayıpları görülmektedir (Davis, 2003).

Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayrisafi milli hasıllarının % 3,5-5 arasında değişmektedir. Bu kadar yüksek kayıpların oluşu, buna paralel endüstrinin gelişimi, dayanıklı ve kararlı malzemelere olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu amaçla son yıllarda özellikle seramik esaslı malzemeler büyük ilgi toplamaktadır. Fakat bunlarda, tüm mekanik özelliklere, konvansiyonel malzemeler gibi cevap verememekte, hammadde üretimi ve şekillendirmedeki zorluklar fiyatın yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple mümkün olduğu kadar ucuz ve gerekli yapısal özellikleri sağlayan, buna karşılık yüzey özellikleri gelişmiş malzemelerin üretilmesi ağırlık kazanmıştır. Gerekli yüzey özellikleri sağlamak için günümüzde kullanılan yüzey işlemleri gittikçe önem kazanmıştır(Yılmaz, 2008).

Çizelge 1.1 Metalik Korozyonun Amerika Birleşik Devletlerine Maliyeti (Davis, 2003)

| Endüstri          | Milyar Amerikan Doları |       |
|-------------------|------------------------|-------|
|                   | 1975                   | 1995  |
| Bütün Endüstriler | 82,0                   | 296,0 |
| Motor Taşıtları   | 31,4                   | 94,0  |
| Uçak              | 3,0                    | 13,0  |
| Diğer Endüstriler | 47,6                   | 189,0 |

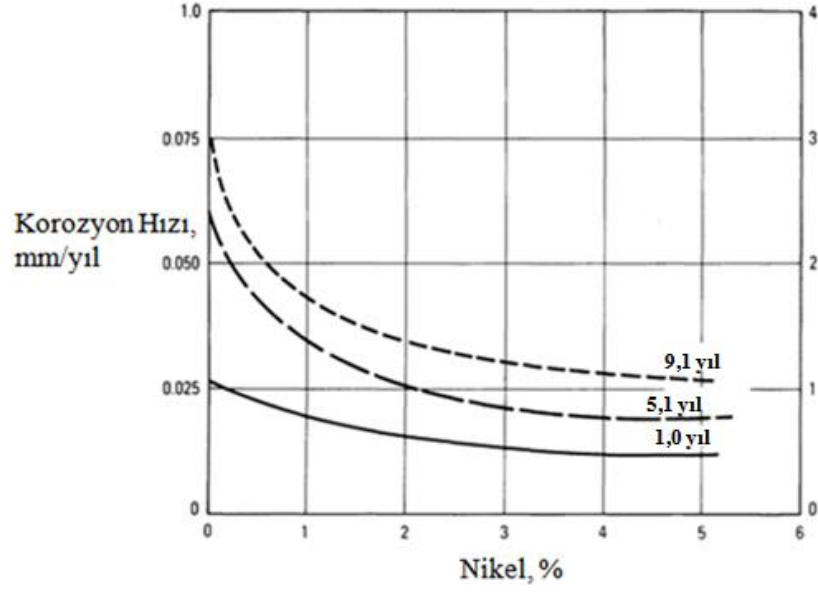
Yüzey işlemleri; sertlik, yorulma, aşınma, korozyon ve ısıl şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu özellikler arasında parçanın aşınma ve korozyona karşı direncinin artırılması önem açısından ilk sırada yer alır. Bu amaçla son yıllarda oksit, karbür, borür, nitrür ve çeşitli intermetalik kaplamalar büyük ilgi toplamaktadır(Yılmaz, 2008).

Karbonlu çelikler sınırlı korozyon direncine sahip olmalarına karşın, mükemmel mekanik özellikleri, kaynaklanabilirlik özellikleri ve düşük üretim maliyetleri nedenleriyle çok yaygın olarak deniz uygulamalarında, nükleer ve fosil yakıt enerji santrallerinde; taşınım, kimyasal, maden, yapım ve metal proses ekipmanlarında kullanılmaktadır. Bu alanların hepsi korozyon problemleri gösterir. Bir kural olarak düşük karbonlu çelikler (0,08-0,28% C), orta karbonlu (0,28-0,55% C) ve yüksek karbonlu(0,55-1% C) çeliklere göre daha yüksek korozyon direncine sahiptirler(Davis, 2003).

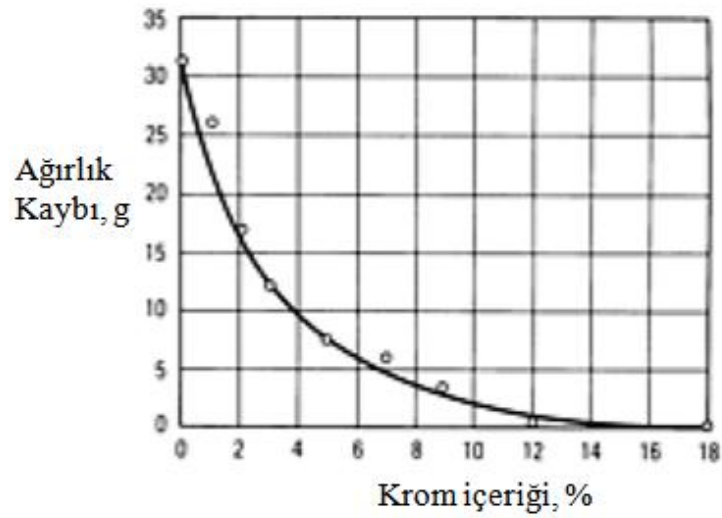
Nikel ve krom korozyon direnci yüksek olan elementlerdir. Artan nikel ve krom oranıyla çeliklerde korozyon direncinin arttığı çizelge 1.2, şekil 1.1 ve şekil 1.2 ‘ de görülmektedir.

Çizelge 1.2 Nikel ve krom oranının çeliklerin korozyon direncine etkisi(Bardal, 2003)

| % Ni | Korozyon Hızı, mm/ yıl | % Cr | Korozyon Hızı, mm/ yıl |
|------|------------------------|------|------------------------|
| 0    | 0.9                    | 0    | 0.9                    |
| 3    | 0.1                    | 2.25 | 1.25                   |
| 5    | 0.075                  | 5    | 0.525                  |
| 9    | 0.05                   | 9    | 0.04                   |
|      |                        | 12   | 0                      |



Şekil 1.1 Çeliğin atmosferik korozyonuna nikelin etkisi(ASM Handbook, 1987)



Şekil 1.2 Çeliğin deniz suyundaki korozyonuna krom miktarının etkisi(ASM Handbook, 1987),



Bu çalışmada AISI 1010 ve AISI 1040 çelikleri yüzeylerine elektrolitik olarak nikel ve krom kaplanmış, kaplanan çeliklere farklı sıcaklıklarda (700 °C ve 800 °C) ısıtılma işlemi uygulanmak suretiyle nikelin ve kromun çeliklerde yayılması sağlanmış, böylece AISI 1010 ve AISI 1040 çelik yüzeylerinde nikel ve krom miktarı artırılarak adeta alaşımlı çelik gibi davranmaları amaçlanmıştır. Isıl işlem sonrası yüzeylerine nikel ve krom yayındırılan çeliklerin karakterizasyonu yapılmıştır. Difüzyon bölgesi taramalı elektron mikroskopunda(SEM) incelenmiş ve difüzyon bölgesinde EDS analizi yapılmış, kalınlığı ölçülmüş, difüzyon bölgesinin korozyon davranışları incelenmiş ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır.

## 2. YÜZEY İŞLEMLERİ

Yüzey işlemleri ve mühendisliği son yıllarda hızlı olarak gelişmesine rağmen yüzey işlemlerine dair pratik bilgiler oldukça eskidir. İ.Ö. 880 yıllarında Homer'in Odysseus'unda, demirci ustalarının baltaların yüzeyini sertleştirdiklerine dair bilgiler bulunmaktadır. Odysseus'un Tepegöz'ü öldürmek için kullandığı zeytin dalından yapılmış silahını sertleştirmek için yaptığı işlemler detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Alman keşiş-yazar Theofilus'un karbürizasyonla yüzey sertleştirmesi işleminden bahsetmiştir. 11 yy.da Çinli'lerin silahların mukavemetini arttırmak için soya fasulyesinin parçalanmasından(ayrışması) faydalandığı bilinmektedir. Bütün bunlara rağmen 20 yy. başlarına kadar yüzey işlemleri bir disiplin olarak ele alınmamıştır. Çizelge 2.1'de yüzey işlemlerinin genel bir sınıflandırması bulunmaktadır(Osma, 1999).

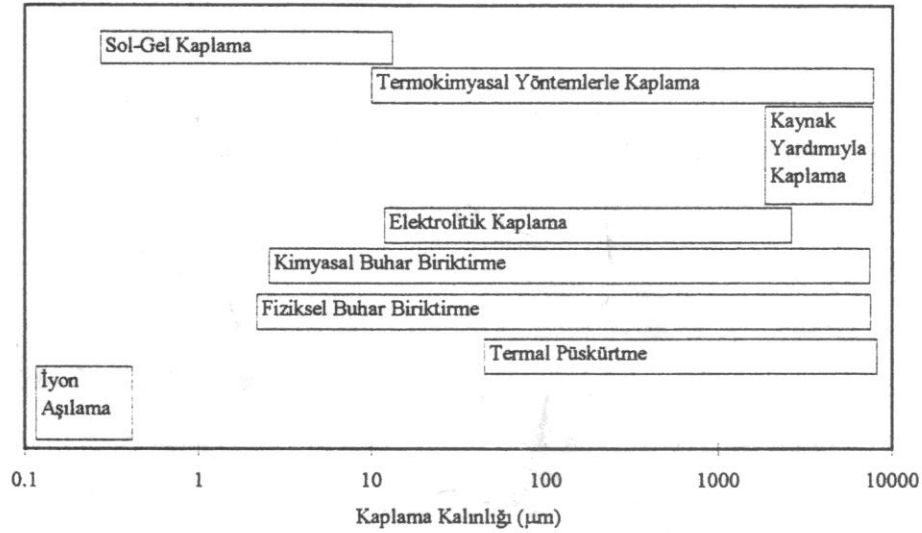
Çizelge 2.1 Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması(Osma, 1999)

| Yüzey İşlemleri           |                           |                     |
|---------------------------|---------------------------|---------------------|
| Yüzeye Malzeme Eklenmesi  | Yüzey Kimyasal Bileşimini | Yüzey Mikroyapısını |
|                           | Değiştirme                | Değiştirme          |
| Kaynak                    | Yüzey Sertleştirme        | Mekanik İşlemler    |
| Termal Püskürtme          | Difüzyonla Yüzey İşleme   | Isı Etkisiyle Yüzey |
| Giydirme                  | Kimyasal İşlemler         | İşlem Yapmak        |
| Elektrolitik Kaplama      |                           |                     |
| Buhar Biriktirme          |                           |                     |
| Kimyasal Yöntemle Kaplama |                           |                     |

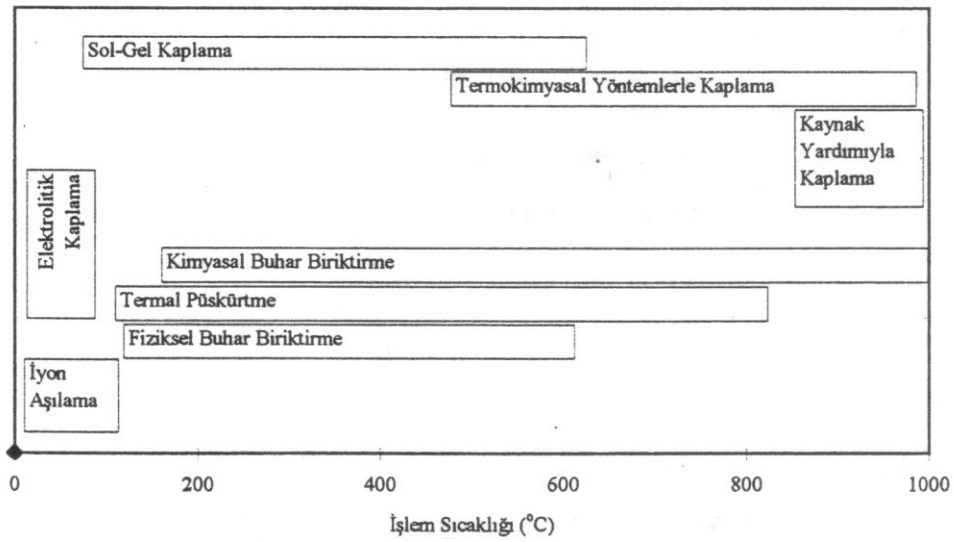
Yüzey özelliklerini değiştirebilecek pek çok teknik bulunmaktadır. Yüzey işlem ve kaplama tekniklerinin seçimi fonksiyonel isteklere, şekil-boyut gibi geometrik faktörlere; taban malzeme özelliklerine ve yüzey işlemleri-kaplama-taban malzemesi uyumu gibi özelliklere bağlıdır(Osma, 1999).

Temel olarak yüzey mühendisliği iki ana grupta ele alınabilir: Yüzey işlemleri ve yüzey kaplama

teknikleri. Yüzey kaplama teknikleri kalınlık ve işlem sıcaklığı kriterlerine göre karşılaştırılabilir. Şekil 2.1’de yüzey kaplama tekniklerinin uygulandığı sıcaklık ve elde edilen kalınlık aralığı görülmektedir(Osma, 1999).



(a)



(b)

Şekil 2.1 Yüzey kaplama teknikleriyle elde edilen kaplamaların a) tipik kalınlık aralığı ve b) işlem sıcaklıkları(Osma, 1999).

Pek çok yüzey işlemi:

- a) Yüzey sertliğini arttırmak,
- b) Aşınma ve korozyon direncini arttırmak,
- c) Sürtünmeyi azaltmak

amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçlarla yüzeyde aşınma direnci istenen takım ve kalıplara yapılan yüzey işlemleri:

1. Yüzey sertleştirme
  - a) Nitrürleme
    - i. Gaz nitrürleme
    - ii. Sıvı nitrürleme
    - iii. Plazma veya iyon nitrürleme
  - b) Karbürleme
  - c) Borlama
2. Yüzey kaplama
  - a) Oksit kaplama
  - b) Sert krom kaplama
  - c) Akımsız nikel kaplama
  - d) Kimyasal buhar biriktirme(KBB)
  - e) Fiziksel buhar biriktirme(FBB)
3. Yüzey modifikasyonu
  - a) İyon ekleme
  - b) Yüzey alaşımlandırma
  - c) Lazerle yüzey işlemleri

gibi gruplara ayrılabilir.

Holmberg yüzey kaplama tekniklerini, işlemin yapıldığı fazlara göre:

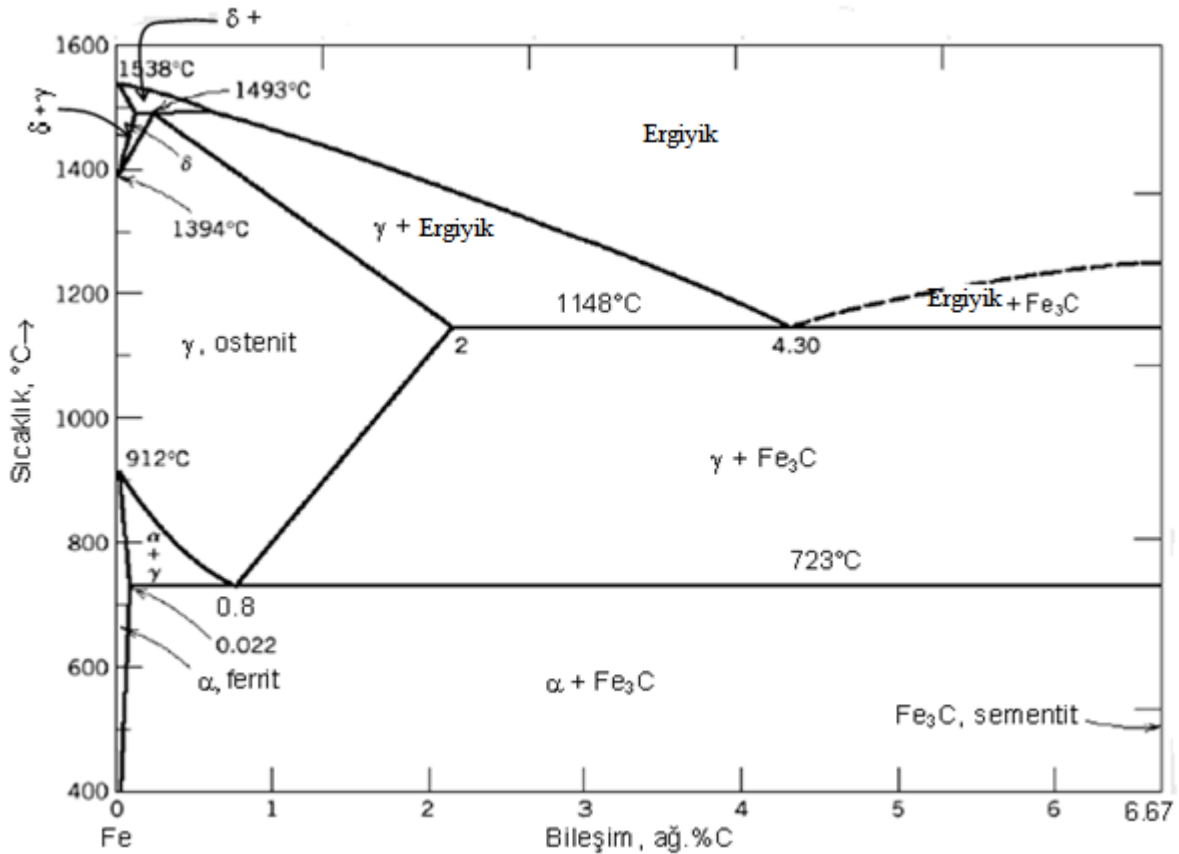
- a) Gaz fazında,
- b) Çözelti içerisinde,
- c) Ergimiş veya yan-ergimiş fazlarda

yapılanlar olmak üzere üç gruba ayırmıştır(Osma, 1999).

### 3. ÇELİKLER

Çelik; bir demir (Fe)-karbon (C) alaşıımıdır(Şekil 3.1). Çeliğin içerisinde karbondan başka farklı oranlarda alaşım elementleri ve empürite elementleri de bulunmaktadır. Çeliğe farklı özellikler kazandıran içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin iç yapısıdır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah, normalizasyon vs.) ile iç yapı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelikler elde edilebilir. Çelikler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadırlar:

- Karbon ve alaşımlı çelikler olarak bileşimlerine göre
- Üretim yöntemlerine göre
- Son üretim yöntemine göre
- Ürün şekline göre
- Kullanım yerleri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre(Güngör, 2001).



Şekil 3.1 Fe-C denge diyagramı[1]

### 3.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması

Çelikler bazen içerdikleri karbon oranına göre düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu çelikler olmak üzere üç kısma ayrılırlar.

#### 3.1.1 Düşük Karbonlu Çelikler

Bu çelikler % 0,25 oranına kadar karbon içermektedirler. Yumuşak ve çok yumuşak çelikler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Dünya çelik üretiminin en büyük kısmını teşkil ederler. Yassı mamul ve inşaat sanayinde ve de konstrüksiyonda kullanılan çubuk, profil v.b. uygulamalarda kullanım alanı bulurlar. Teknolojide sementasyon ve nitrürasyona tabi tutularak, yüzeyi sert ve iç kısmı tok olan çeliklerde bu grupta yer almaktadırlar. Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal olarak bileşim aralıkları Çizelge 3.1' de verilmektedir(Güngör, 2001).

Çizelge 3.1 Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları(Güngör, 2001).

| Element | % Ağırlıkça |
|---------|-------------|
| C       | 0,00-0,20   |
| Mn      | 0,30-0,60   |
| Si      | 0,10-0,20   |
| P       | Max. 0,04   |
| S       | Max. 0,05   |

#### 3.1.2 Orta Karbonlu Çelikler

Bu çelikler % 0,25 ile % 0,55 arasında karbon içeren çeliklerdir. Isıl işleme çok uygun çeliklerdir. Yani, bu çeliklerin yapı ve özellikleri ısıl işlemler sayesinde çok kolay değiştirilebilmektedir. Bu bakımdan orta karbonlu çeliklerin kullanım sahaları özellik arz etmektedir. Bu çelikler karbon oranlarına göre genel dövme çelikleri, mil çelikleri ve aşınmaya dayanıklı çelikler olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadırlar. Özellikle makine üretim sanayinin tercih ettiği çeliklerdir. İşlenebilme kabiliyetleri ve şekil alabilme düşük karbonlu çeliklere oranla daha düşüktür. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları Çizelge 3.2' de verilmektedir(Güngör, 2001).

Çizelge 3.2 Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları(Güngör, 2001)

| Element | % Ağırlıkça |
|---------|-------------|
| C       | 0,20-0,50   |
| Mn      | 0,60-0,90   |
| Si      | 0,15-0,23   |
| P       | Max. 0,04   |
| S       | Max. 0,05   |

### 3.1.3 Yüksek Karbonlu Çelikler

% 0,55 ile % 0,90 arasında karbon içeren çeliklerdir. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. Kullanım alanlarına örnek olarak pres kalıp blokları gösterilebilir. Normal halde yüksek mukavemetli ve sünekliği az olan çeliklerdir. Isıl işlemle sertleşebilmeleri sayesinde çok yüksek sertliklere ulaşılabilir. Bu bakımdan aşınmaya dayanıklı ve kesici özellikle özellik kazanırlar. İşlenme ve şekil alabilme kabiliyetleri düşüktür. Bununla beraber kaynak kabiliyetleri de düşüktür ve bundan dolayı özel tekniklerle kaynak edilebilirler. Yüksek karbonlu çeliklerin bileşim aralıkları Çizelge 3.3’ de verilmektedir(Güngör, 2001).

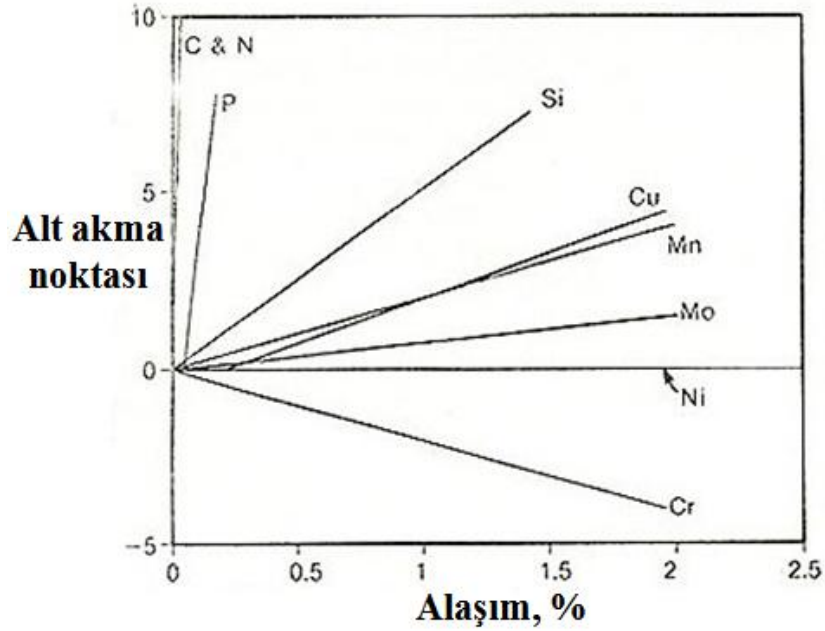
Çizelge 3.3 Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları(Güngör, 2001)

| Element | % Ağırlıkça |
|---------|-------------|
| C       | 00,55-0.90  |
| Mn      | 0,70-1,00   |
| Si      | 0,15-0,30   |
| P       | Max. 0,04   |
| S       | Max. 0,05   |

### 3.2 Alaşım Elementlerinin eliğe Etkisi

elik içerisine etimi sırasında giren veya yeni özellikler kazandırmak için sonradan katılan karbon, silisyum, mangan, fosfor, kükürt, oksijen, bakır, krom, nikel, volfram, molibden, vanadyum, kobalt ve alüminyum gibi elementlere alaşım elementleri denir. eliklere alaşım elementlerinin katılmasının sebepleri genel olarak şunlardır:

- Çekme, basma, vurma, kopma vb. dayanımlarını arttırmak
- Sertleştirmeyi sağlamak veya kolaylaştırmak
- Elektrik direncini arttırmak
- Isıya karşı dayanımını arttırmak veya düzenli bir ısıl genleşmeyi sağlamak
- Kristal kafes yapısını değiştirmek
- Manyetik özelliklerini değiştirmek
- Oksitlenmeyi azaltmak
- Korozyona ve aşınmaya karşı direnci arttırmak
- Kimyasal maddelere karşı dayanımı arttırmak
- Talaş kaldırma, sıcak soğuk biçimlendirme, kaynak etme gibi imalat işlemlerini kolaylaştırmak veya bu işlemlere uygun hale getirmek (Güngör, 2001)



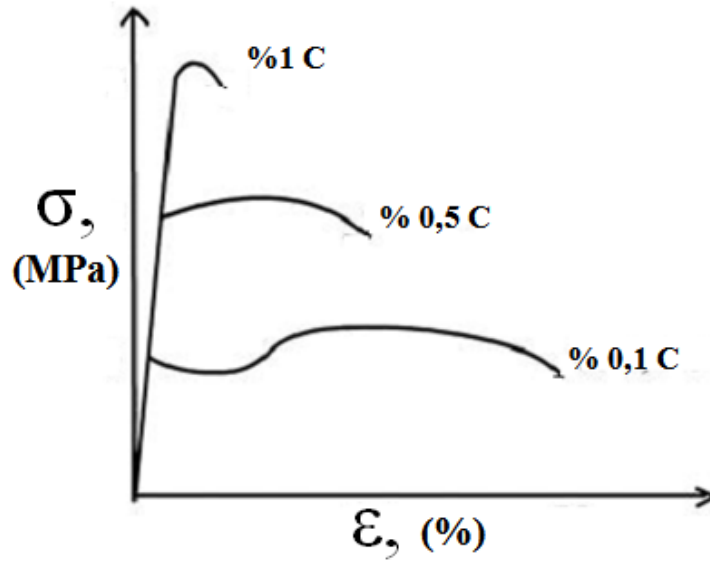
şekil 3.2 Karbonlu eliklerde değişik alaşım elementlerinin alt akma noktasına etkisi[2]



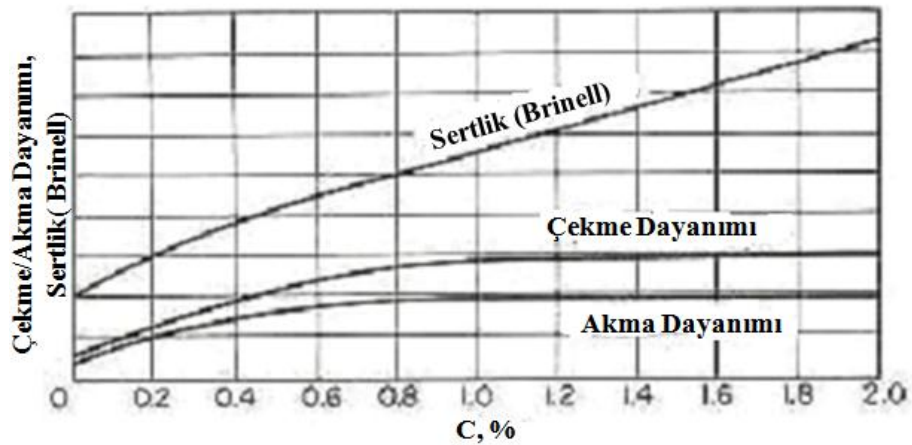
### 3.2.1 Karbon

Karbon, çeliğin meydana gelmesini sağlayan demirden sonraki ana alaşım elementidir. Ayrıca çeliğe sertlik ve dayanım sağlayan en önemli katkı elemanı karbondur. Karbon, çeliğin ergime derecesini düşürür, oksitlenmeyi azaltır, korozyon ve aşınma dayanımı sağlar, elektrik direnci ve ısı dayanımını artırır.

Ancak karbon, çeliğin talaş kaldırabilme, kaynak edilebilme, elastikiyet, eğme, dövme ve derin çekme gibi sıcak veya soğuk olarak biçimlendirilebilme kabiliyetlerini azaltır(Güngör, 2001).



Şekil 3.3 Çeliklerde karbon oranına bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme eğrileri[3]



Şekil 3.4 Karbonun çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi[4]

### **3.2.2 Silisyum**

Silisyum çeliğin akma sınırı ve çekme dayanımını artırır, sertleşme sıcaklığını düşürür ve martenzit yapı oluşturulabilmesi için zaman kazandırarak sertleşmenin çekirdeğe kadar olmasını sağlar, kimyasal maddelere karşı dayanımı artırır. Ayrıca silisyum da çeliğe manyetik özellikler kazandırır.

Ancak silisyum çeliğin dokusunu kabalaştırarak darbe dayanımını azaltır. Fazla oranda silisyum katılması sonucu da çeliğin kaynak edilebilme, talaş kaldırılabilme, dövülerek biçimlendirilebilme kabiliyetlerini azaltır(Güngör, 2001).

### **3.2.3 Mangan**

Mangan, çeliğin kaynak edilebilme kabiliyetini oldukça yükseltir, istenmeyen oksijen ile bileşik yaparak dışarı atar, sertleştirme derinliğini ve aşınma dayanımını artırır, ısıl genleşmeyi azaltır.

Mangan çeliğin faz dönüşüm hızını yavaşlatarak, sertleşmenin çekirdeğe kadar olmasını sağlar. Ayrıca mangan çelik içerisindeki kükürt ile birleşerek haddeleme sırasında düzenli bir lifli yapı oluşmasını sağlar. Bu sayede çelikler, lif yönünde yüksek çekme dayanımı ve sünekliğe sahip olurlar(Güngör, 2001).

### **3.2.4 Fosfor**

Çelik içerisine üretim aşamaları sırasında kendiliğinden giren fosfor, az oranda çekme ve korozyon dayanımını yükseltse de istenmeyen bir katkı elemanıdır.

Fosfor, çeliklerin kırılganlık özelliğini artırmakta, elektrik direnci, biçimlendirilme, kaynak edilebilme ve talaş kaldırılabilme kabiliyetlerini de oldukça azaltmaktadır(Güngör, 2001).

### **3.2.5 Kükürt**

Çelik içerisinde doğal olarak demir filizinden veya üretim aşamaları sırasında giren kükürt, fosfor gibi olması istenmeyen bir katkı elemanıdır. Çünkü çeliğe aşırı derecede kırılganlık sağlar ve düşük sıcaklıklarda da çatlaklar oluşur(Güngör, 2001).

### **3.2.6 Oksijen**

Oksijen, çelik için çok fazla zararı olmasına karşın, üretimi sırasında çeliğin içerisine girmesi

engellenememektedir. Oksijen, demir ile birleşerek demir oksit yaparak korozyon oluşmasını sağlar, bu da çeliğin kırılganlık ve yaşlanma özelliklerini artırmaktadır(Güngör, 2001).

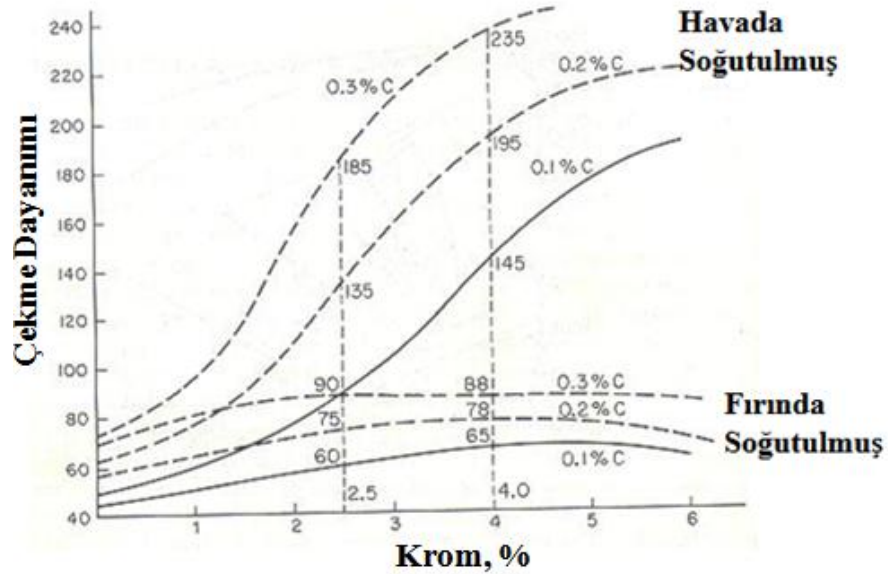
### 3.2.7 Bakır

Bakır, hurda malzemelerin geri dönüşümü sırasında çeliklerin içerisine girer. Bakır, çeliklerin korozyon direncini ve az da olsa dayanımını artırır(Güngör, 2001).

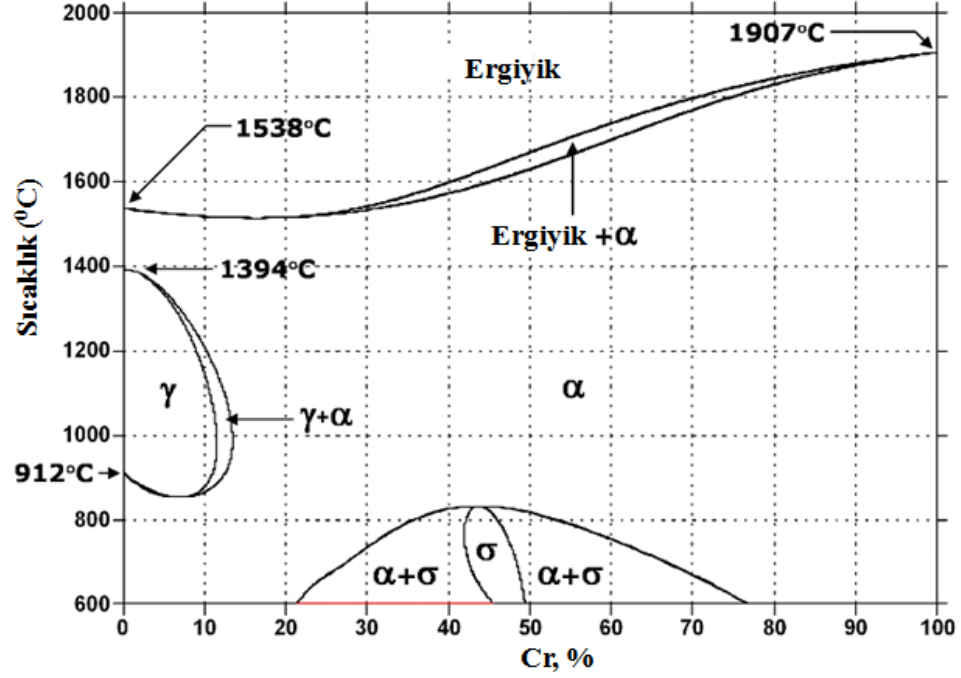
### 3.2.8 Krom

Krom, katkı elemanlarından en önemlilerinden birisidir. Krom, çeliğin akma sınırı ve çekme dayanımını, aşınma, ısı ve korozyon direncini yükseltir, faz dönüşümlerini yavaşlatarak çekirdeğe kadar sertleşmesini sağlar ve ince taneli bir yapı oluşturur. Bu özelliklerinden dolayı kesici takım yapımında krom katkılı çelikler kullanılır. Ayrıca % 3 oranında krom içeren çelikler, manyetik özellikler kazandıklarından dolayı, mıknatıs yapımında kullanılmaktadır(Şekil 3.6).

Ancak kromlu çeliklerin sertlikleri fazla olduğundan darbelere karşı dayanıksızdır ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyetleri düşüktür(Güngör, 2001).



Şekil 3.5 Düşük karbonlu çeliklerde krom miktarının çekme dayanımına etkisi[5]

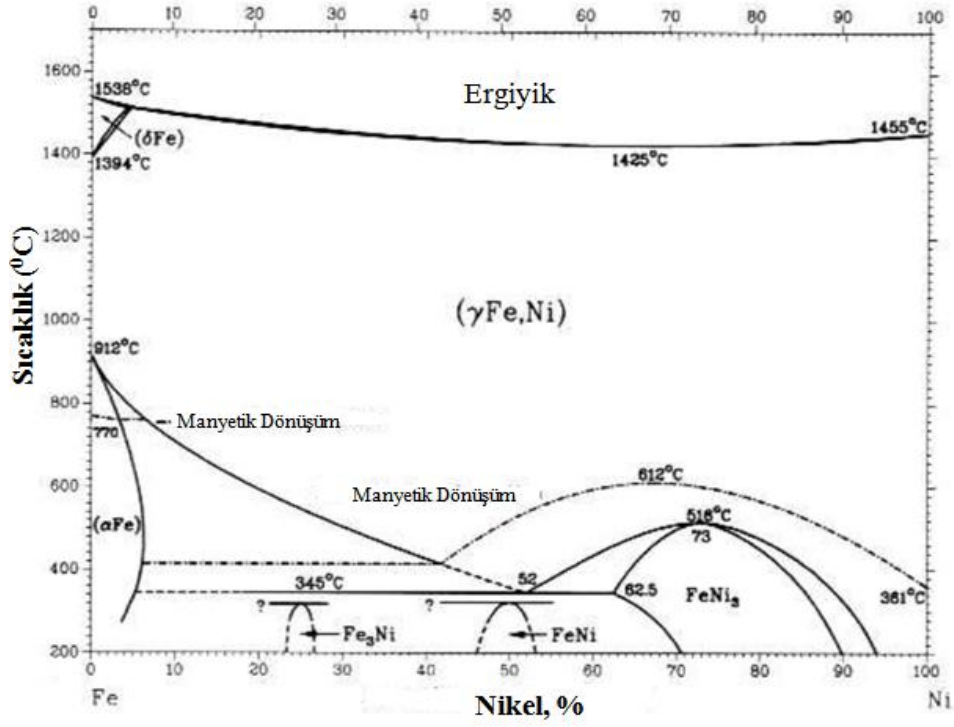


Şekil 3.6 Fe-Cr denge diyagramı[6]

### 3.2.9 Nikel

Genellikle krom ile birlikte kullanılan nikel, çeliğin doku dönüşüm hızını düşürerek çekirdeğe kadar sertleşmesini, paslanmaya, korozyona (şekil 1.1 de görüldüğü gibi), kimyasal maddelere, yüksek ısıya ve darbelere karşı dayanımı, elastikiyet özelliğinin artmasını sağlar.

Birçok mekanik parçanın yapımında kullanılan nikel katkılı çelikler(Şekil 3.7), yüksek ısı dayanımlarından dolayı ısıl genleşme dayanımları da fazla olduğundan, elektrik direnç tellerinin yapımında kullanılmaktadırlar(Güngör, 2001).



Şekil 3.7 Fe-Ni denge diyagramı[7]

### 3.2.10 Volfram

Volfram, çeliğin yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını ve karbon ile karbür oluşturarak sertliğini çok fazla artırır. Ayrıca volfram, çeliğin doku dönüşüm hızını düşürdüğünden çekirdeğine kadar sertleşmesini sağlar.

Volfram oranı yüksek olan çelikler kesici takım, az oranda olan çelikler ise sıcak iş kalıplarının ve çeliğe manyetik özellikler de kazandırdığından mıknatıs yapımında kullanılırlar(Güngör, 2001).

### **3.2.11 Molibden**

Molibden çeliğin akma sınırı ve çekme dayanımını kaynak edilebilme kabiliyetini, gevrekliğini azaltarak darbe dayanımını artırır, doku dönüşüm sıcaklığını azaltır. Ayrıca molibden, çeliğin ısıtılma işlemleri sırasında, düzenli bir dokunun oluşmasını sağlar(Güngör, 2001).

Ancak molibden, çeliğin dövme gibi soğuk olarak biçimlendirilme kabiliyetlerini azaltır.

### **3.2.12 Vanadyum**

Vanadyum, çeliğe sertlik ve özlülük kazandırarak, ince taneli bir yapı oluşmasını sağlar. Bu sayede darbelere ve yüklere karşı yüksek dayanım gösteren vanadyumlu çelikler, kesici takım ve vuruntulu çalışan mekanik parçaları yapımında kullanılırlar.

Ancak vanadyum, çeliklerin doku dönüşüm sıcaklıklarını yükselttiğinden uygulanacak ısıtılma işlemlerinde yüksek sıcaklıklarda yapılmalarını gerektirmektedir(Güngör, 2001).

### **3.2.13 Kobalt**

Kobalt çeliğin sertliğini, yüklere ve ısıya karşı dayanımını artırarak, ince taneli bir yapı oluşmasını sağlar. Ayrıca kobalt manyetik özelliklere sahip olduğundan, bu çelikler mıknatıs yapımında sıkça kullanılmaktadır(Güngör, 2001).

### **3.2.14 Alüminyum**

Alüminyum, çelik içerisindeki oksitlenmeyi ve pullanmayı önler. Ancak % 0.5 oranından fazla çeliğe alüminyum katılırsa, karbon ayrılarak grafit haline gelir ve kaba taneli bir yapı oluşur.

Ayrıca alüminyum, azota karşı yüksek ilgi gösterdiğinden, nitrasyon çelikleri için faydalı bir katkı elemanıdır(Güngör, 2001).

## **3.3 Uluslar Arası Çelik Standartları**

Çelik üretimi yapan, yaptıkları üretimi iç ve dış piyasalarda kullanan tüm ülkelerde çelik standartları vardır. Ülkeler dış piyasalara satacakları çelik ürünlerinin, dış ülkelerin ihtiyaçlarına cevap verebilecek nitelikte olması için, bu ülkelerin standartlarına uygun olmasını sağlamak

zorundadır. Bu bir bakıma, uluslar arası standart çalışmalarının yapılmasına neden olmaktadır(Güngör, 2001).

### **3.3.1 Türk Standartları Enstitüsü (TSE) Standartları**

Türk Standartları Enstitüsü (TSE) malzeme türleri ile ilgili standartları hazırlarken DIN Alman endüstri çelik normlarını esas almıştır. Bu normda, çeliklerin sınıflandırılması, ergitme ve ısıt işlemleri, semboller, kısa gösterme şekilleri ve garanti edilen özellikler, ergitme ve ısıt işlemleri, semboller, kısa gösterme şekilleri ve garanti edilen özellikler ile ilgili bilgiler vardır. Buna göre çeliklerin sınıflandırılması ve sınıflandırmaya ait sembol sayıları şu şekilde yapılmıştır(Güngör, 2001).

- Kütle çelikleri: Adi çelikler, 00; Genel yapı çelikleri, 01; Genel yapı dışındaki çelikler, 02
- Kalite çelikleri: Sade karbonlu çelikler, 03-06; Otomat çelikleri, 07; Az alaşımlı çelikler, 08-09
- Alaşımsız asal çelikler: Özel fiziksel nitelikli çelikler, 10; Makine yapı çelikleri, 11-12, 13-14; Takım çelikleri, 16-18, 19
- Alaşımlı çelikler: Takım çelikleri, 20-28, 29; Çeşitli çelikler, 30-31, 32-39; Kimyasal etkilere dayanıklı çelikler, 40-49, Makine yapı çelikleri, 50-85; Sert metaller, 86-89

Çeliklerin üretimi, ısıt işlemleri ve garanti edilen mekanik özellikleri de TSE tarafından standartlaştırılmıştır. Bunları gösteren tablolar yardımıyla, sembolik olarak belirtilmek istenilen çelik gösterilebilir(Güngör, 2001)..

### **3.3.2 DIN Alman Endüstrisi Çelik Standartları**

Alman standardı, daha ziyade çeliklerin dayanımını esas alırken, çeliğin kimyasal bileşimi dikkate almaz. DIN Alman standartlarında çelik “St”, çelik döküm “Stg” sembolleri ile gösterilmektedir. Bundan sonra gelen 37, 42... gibi rakamlar, çeliğin çekme dayanımını gösterir. Çekme dayanımı karbon oranıyla bağlantılıdır(Güngör, 2001)..

Alman standartlarında malzeme tanımlaması için 3 değişik sistem kullanılmaktadır.

- 1) Malzeme numarası
- 2) Çeliğin çekme dayanımına göre kısa işareti

3) Çeliğin kimyasal analizine göre kısa işareti: - Düşük alaşımlı çelikler, - Karbonlu çelikler, - Yüksek alaşımlı çelikler

TSE standartlarında olduğu gibi DIN standartlarında da çeşitli sembolleri gösteren tablolar vardır. Bu tablolar yardımıyla çelikler gösterilebilir(Güngör, 2001).

### 3.3.3 AISI / SAE Standartları

SAE (Otomotiv Mühendisleri Birliği) standardı çeliklerin kimyasal bileşimlerini dikkate alır. SAE ve AISI sistemlerinde malzemenin kısa işareti dört veya beş haneli sayı sistemi kullanılarak yapılır. Beş haneli sayı sistemi karbon oranı % 1' in üzerinde olduğu zaman yapılır. İlk iki rakam çelik türünü, diğer iki veya üç rakam ise % C miktarının 100 katıdır(Güngör, 2001)..

Çizelge 3.4 SAE / AISI standartına göre çelik türleri(Güngör, 2001).

| Çelik Türleri |                                      |
|---------------|--------------------------------------|
| Sembol        | Anlamı                               |
| 1             | Karbonlu çelikler                    |
| 2             | Nikelli çelikler                     |
| 3             | Nikel ve krom alaşımlı çelikler      |
| 4             | Molibdenli çelikler                  |
| 5             | Kromlu çelikler                      |
| 6             | Krom ve vanadyum alaşımlı çelikler   |
| 7             | Volframli çelikler                   |
| 8             | Mangan ve silisyum alaşımlı çelikler |
| 9             | Silisyumlu çelikler                  |

Örneğin AISI 1010 ve AISI 1040 çelikleri ile ilgili özellikler ve değerlendirmeler aşağıdaki gibi verilebilir.



AISI 1010 çeliği % 0,1 C içeren düşük karbonlu, nispeten düşük dayanımlı çeliktir fakat su verme ve temperlemeyle dayanımı arttırılabilir. AISI 1010 gibi düşük karbonlu çelikler, soğuk başlı tutturaç ve cıvata yapımında kullanılırlar. AISI 1010 çeliklerinin işlenebilirlikleri özellikle soğuk çekme ve soğuk işlenmiş durumlarda oldukça iyidir. AISI 1112 çeliği referans alındığında (%100 işlenebilir olarak farzedilir), AISI 1010 çeliği % 55 işlenebilirlik oranına sahiptir. AISI 1010 çeliğinin işlenebilirliği de iyidir, alaşım iyi sünekliğe sahiptir. AISI 1010 çeliği bütün standart kaynak yöntemleriyle kaynaklanabilir. Bu çelikler genelde tavllanmış ya da yüzeyi sertleştirilmiş hallerinde kullanılırlar[8,9].

Çizelge 3.5 AISI 1010 çeliğinin kimyasal bileşimi[8]

| Element     | C           | Mn        | P            | S            | Fe         |
|-------------|-------------|-----------|--------------|--------------|------------|
| Ağırlık (%) | 0.08 - 0.13 | 0.3 - 0.6 | 0.04 (maks.) | 0.05 (maks.) | Geri kalan |

Çizelge 3.6 AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri[9]

| Yoğunluk(g/cm³) | Poisson Oranı | Elastik Modül(GPa) | Çekme Dayanımı(MPa)                      | Akma Dayanımı(MPa) | Uzama(%) | Sertlik(HB) |
|-----------------|---------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|----------|-------------|
|                 |               |                    | (soğuk çekilmiş 19-32 mm yuvarlak çubuk) |                    |          |             |
| 7.7-8.03        | 0.27-0.30     | 190-210            | 365                                      | 305                | 20       | 105         |

AISI 1040 ise çeliği düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek karbon (% 0.40) içeriğine ve daha yüksek dayanıma sahip, orta karbonlu çeliktir. Krank mili yapımında, kavrama ve soğuk başlı parçaların yapımında kullanılır. İşlenebilirliği iyidir, AISI 1112 çeliği referans alındığında (%100 işlenebilir olarak farzedilir), AISI 1010 çeliği % 60 işlenebilirlik oranına sahiptir. AISI 1040 çeliği bütün kaynak yöntemleriyle kaynaklanabilir. Bu çelikler 850-950 °C'de ısıtıl işlemi takiben su verme ve temperlemeyle sertleştirilebilirler[10,11].

Çizelge 3.7 AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi[10]

| Element     | C         | Mn        | P            | S            | Fe         |
|-------------|-----------|-----------|--------------|--------------|------------|
| Ağırlık (%) | 0.37-0.44 | 0.60-0.90 | 0.04 (maks.) | 0.05 (maks.) | Geri kalan |

Çizelge 3.8 AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri[11]

| Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> ) | Poisson Oranı | Elastik Modül(GPa) | Çekme Dayanımı(MPa)    | Akma Dayanımı(MPa) | Uzama(%) | Sertlik(HB) |
|------------------------------|---------------|--------------------|------------------------|--------------------|----------|-------------|
|                              |               |                    | (790 °C’de tavllanmış) |                    |          |             |
| 7.845                        | 0.27-0.30     | 190-210            | 518.8                  | 353.4              | 30.2     | 149         |

#### 4. DİFÜZYON

Sıcaklık yükseldikçe atomların ısı titreşimleri artar ve bir kısmı içinde bulunduğu yapıda bir konumdan diğer konuma atlayarak yer değiştirir. Atomsal yayılım veya difüzyon denen bu olayda önce atomun çevresi ile bağları kopar, sonra atomlar arası boşluklardan geçer ve yeni konumunda tekrar çevresi ile bağ kurar. Malzemelerin işlemlerinde önemli rol oynayan birçok reaksiyon ve proses, belirli katı veya sıvıdan gazı veya diğer bir katı faza kütle transferine dayanır. Bu difüzyon yoluyla gerçekleştirilir. Difüzyon en hızlı gazlarda en yavaş katılarda meydana gelir. En yavaş katılarda meydana gelmesine rağmen, katı durum difüzyonu mühendislik malzemeleri için oldukça önemli bir yere sahiptir (Schaffer vd., 1999; Callister, 2001; Onaran, 2006).

Difüzyon olayı difüzyon çifti gösterilerek örneklendirilebilir. Bu da iki değişik metal çubuğun birbirine eklenmesiyle olur, dolayısıyla iki yüz arasında derin bir temas olur. Bu bakır ve nikel için şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu çift uzatılmış periyot için metallerin ergime sıcaklıklarının altındaki yüksek bir sıcaklığa ısıtılır ve oda sıcaklığına soğutulur. Kimyasal analiz şekil 4.2’de saf bakır ve nikelin alaşım bölgesi tarafından ayrılmasını gösteren durumuna benzer bir durum gösterecektir. Her iki metalin de bileşimleri şekil 4.2 c’de gösterildiği duruma değişir. Bu sonuç, bakır atomlarının nikelde göç ettiklerini ve difüze olduklarını gösterir ki nikel de bakıra difüze olmuştur. Bu süreç, bir metal atomlarının diğer metale difüze olması durumunda interdifüzyon ya da katışkı difüzyonu olarak adlandırılır (Callister, 2001).

Interdifüzyon Cu-Ni difüzyon çifti örneğindeki gibi zaman geçtikçe makroskobik bakış açısıyla bileşimdeki değişimlerden de fark edilebilir. Net bir birikim ya da atomların yüksek bileşim bölgesinden düşük bileşim bölgesine taşınımıdır. Difüzyon ayrıca saf metallerde de meydana gelir. Fakat bütün atomlar aynı tipte pozisyonlarını değiştirirler, bu kendi kendine difüzyon olarak adlandırılır (Callister, 2001).

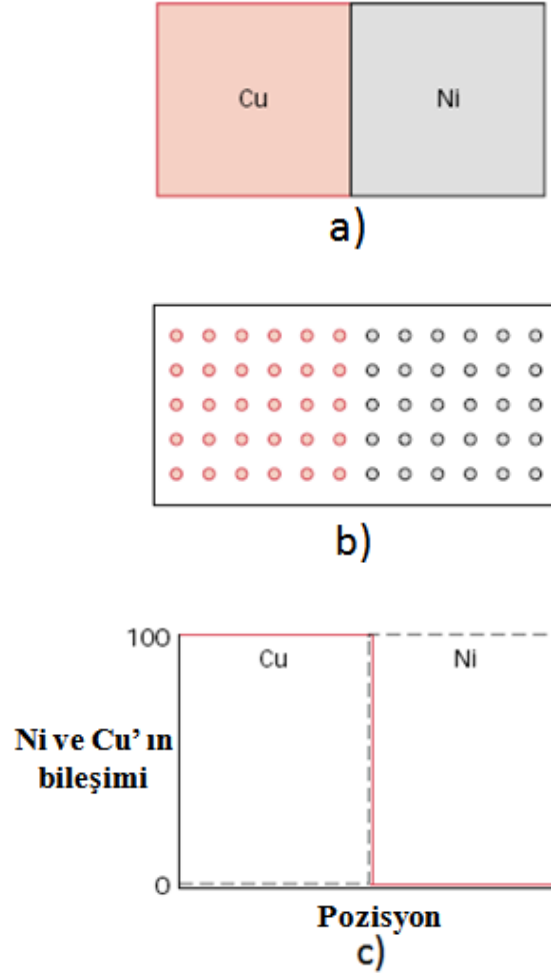
##### 4.1 Difüzyon Mekanizmaları

Atomik bakış açısından difüzyon, atomların bir kafes yerinden diğer kafes yerine basamaklı göçüdür. Gerçekte, katı malzemedeki atomlar kararlı harekettirler, süratle yerlerini değiştirirler. Bir atomun böyle bir hareket yapması için iki duruma değinilmek zorundadır. (1) Boş bitişik bir yer olmak zorundadır. (2) Atom komşu atomlarla arasındaki bağları kırarak kadar yeterli enerjiye

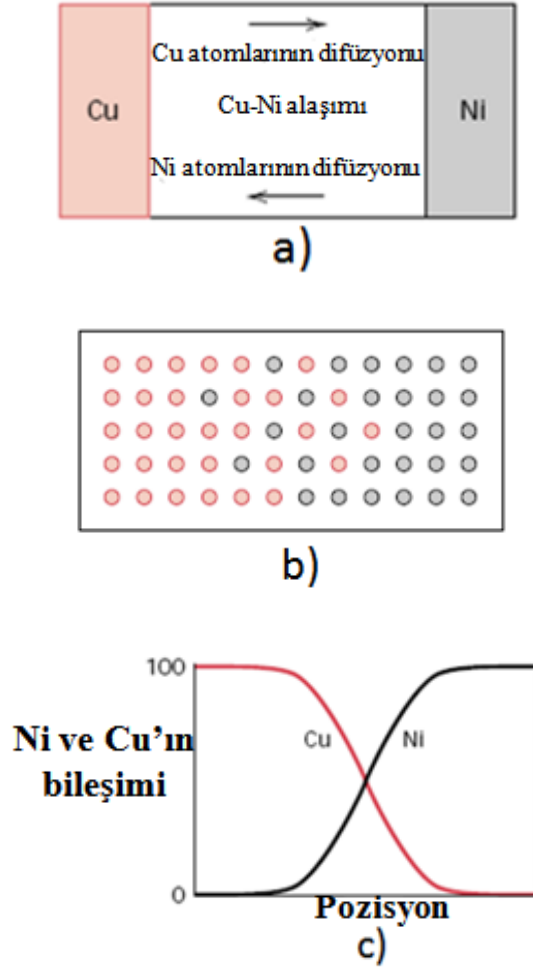
sahip olmalıdır ve ayrıca yer değiştirme boyunca kafes arpılımına neden olur.

Belirli bir sıcaklıkta çok az oranda atom titreşimsel enerjilerinin büyüklüklerinin avantajından dolayı yaynabilmektedirler. Bu oran sıcaklığın artmasıyla artar.

Bu atomik hareket için birkaç model ileri sürülmüş, metalik difüzyon için bu modellerden iki tanesi en önemli yeri tutmaktadır (Callister, 2001).



şekil 4.1 a) Yüksek sıcaklık ısıtıl işlemi görmeden önce Cu-Ni difüzyon çifti, b) Difüzyon iftindeki Cu (renkli halkalar) ve Ni (gri halkalar) atom yerlerinin şematik olarak gösterimleri, c) Bakır ve nikelin difüzyon çifti içindeki bileşimlerinin değişimi (Callister, 2001)



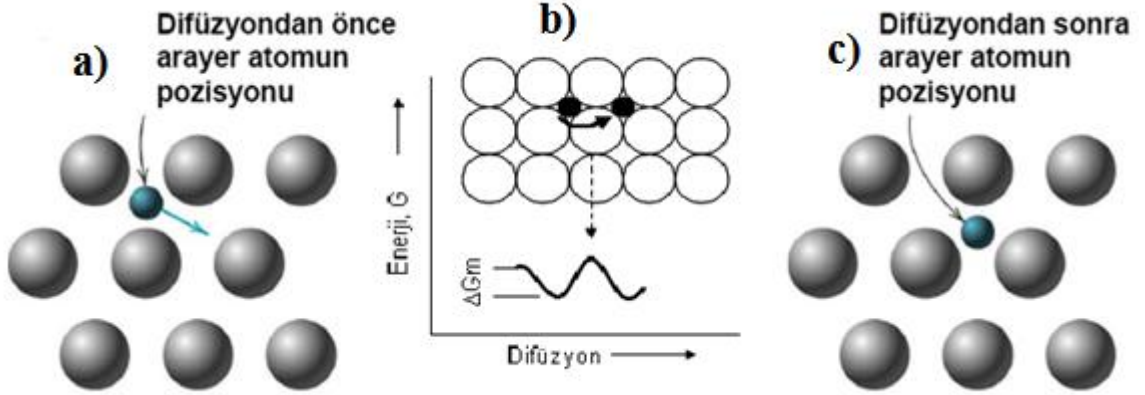
şekil 4.2 a) Yüksek sıcaklık ısıtıl işlemi gördükten sonra Cu-Ni difüzyon çifti, b) Difüzyon çiftindeki Cu (renkli halkalar) ve Ni (gri halkalar) atom yerlerinin şematik olarak gösterimleri , c) Bakır ve nikelin difüzyon çifti içindeki bileşimlerinin değişimi (Callister 2001)

#### 4.1.1 Arayer Difüzyonu Mekanizması

Arayer difüzyonu mekanizmasında, kristal yapıda küçük bir arayer atomu varsa, atom bir arayerden diğeriine hareket eder. Arayer atomlarının yoğunluğu genellikle düşüktür. Arayer difüzyonu mekanizmasında çözünen malzemenin atomlarının çapı (yaklaşık % 40), çözündüğü malzemenin atomlarının çapından küçükse, çözündüğü atomların arasındaki mevcut boşluklardan birisine geçerek boşluğu doldurur. şekil 4.3 arayer difüzyonunun oluşumu şematik olarak görölmektedir (Buytoz, 1999; Fidan, 2006).

Arayer atomlarının denge pozisyonları en az potansiyel enerjiye sahip oldukları (a) pozisyonudur. Bir arayer atomunu komşu bir arayera hareket ettirmek için, komşu kafesin atomları arasından

geçmeye zorlanması gerekir. Neticede (b) pozisyonunda olduğu gibi bir durum oluşur ve en yüksek enerji seviyesine ulaşır. Bu olayın gerçekleşmesi için verilen iş, sistemin serbest enerjisindeki değişimi oluşturur ve (c)'de ki gibi  $\Delta G_m$  kadar artırır.  $\Delta G$  Gibbs enerjisi olarak bilinir.



Şekil 4.3 Arayer difüzyonunun oluşumunun şematik olarak gösterilmesi (Akbulut, 2006; Fidan,2006)

Bir arayer atomu boşluklarla kuşatılmış olup, ısı enerjisinin deformasyon enerjisi engelini aşması ile başka bir arayera atlar. İşte arayer atomlarının kafes yapısı içerisindeki başka bir arayer noktasına göçü şeklinde oluşan difüzyona "arayer difüzyonu" denilmektedir.

Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri B, C, H, N gibi atom yarıçapı küçük elementlerle arayer katı çözeltisi oluştururlar. Malzemelerde arayer noktaları, kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Bunlar oktahedral noktalar olarak bilinir.

Arayer difüzyonu olma ihtimali aynı türden atomlar için yüksek sıcaklıklarda daha fazladır. Ancak çapları ana kafesin atomlarından küçük olan yabancı atomlar için (karbon, azot, hidrojen vb) büyük önem taşır, önemli nokta, bu mekanizmanın ideal yanı tümüyle kusursuz kristallerde daha etkin olabilmesidir (Callister, 2001).

#### 4.1.2 Yeralan Difüzyonu Mekanizması

Bu difüzyon mekanizmasında kafes içerisinde mevcut bir boşluğun olması gerekir. Bu yüzden yeralan difüzyonunun oluşması arayer difüzyonuna göre daha zordur. Arayer difüzyonun da yeterli enerjiye sahip olduğunda atom difüze olabilir. Yeralan difüzyonu mekanizmasında, boş yerler yardımı ile yer değiştirme çok küçük bir aktivasyon enerjisini gerektirir. Artan sıcaklıkla

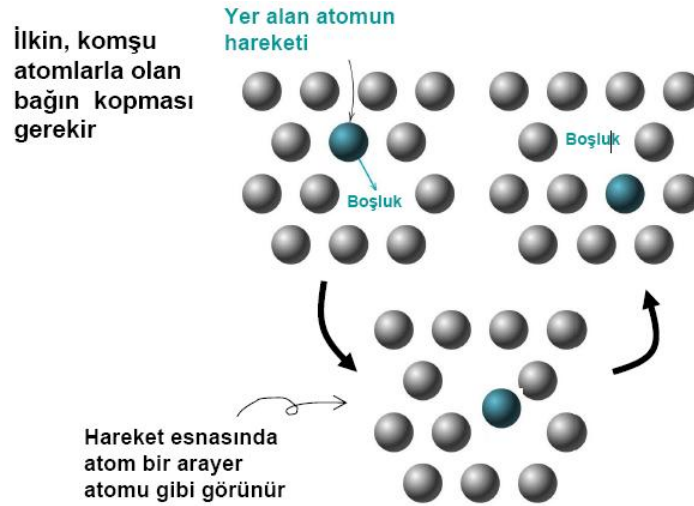
birlikte atomların titreşim ve boş yer yoğunluğu artar, dolayısıyla yayınma kolaylaşır (Fidan, 2006).

Normal olarak bir yer alan atomunun hareketi bitişik komşu atomlar tarafından sınırlandırılmıştır ve atom başka kafes noktasına geçemez. Bununla birlikte komşu nokta boş ise Şekil 3.4'de görüldüğü gibi (mavi) atom bu boşluğa atlayabilir. Atlamanın meydana gelebilmesi koyu renkli atomun komşu atomların arasından geçmesini sağlayacak yeterli titreşim enerjisini elde etme ihtimaline bağlıdır. Bir atomun katı içerisinde göç edebilme oranı boşluk bileşimine bağlıdır. Boşluğa sıçrama ihtimali ve boşluk bileşimi sıcaklıkla yakından ilişkilidir. Şekil 5.4 göz önüne alındığında, boşluğun yanındaki atomun yerinden ayrılabilmesi için aşması gereken aktivasyon enerjisi engelini yenecek temel enerjiye sahip olması şartıyla bir sıçrama yapabilir (Kurt, 1996; Buytoz, 1999).

Yeralan difüzyonunun olabilmesi için;

- Atomal çapları farkının % 15'ten küçük olması (  $r_A - r_B \leq \% 15$  )
- Malzemelerin aynı kristal kafes yapısına sahip olması,
- Elektronegativite farkının küçük olması,
- Valans elektronların eşit olması gerekir.

Yeralan difüzyonuna örnek olarak Cu-Ni, Au-Ag, Fe-Cr, Ti-Zr vb. alaşımlar gösterilebilir.



Şekil 4.4 YMK Kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi (Akbulut 2006)

#### **4.1.3 Boşluk Mekanizması**

Kristallerin tümünde kafes pozisyonlarının bazıları atomlar tarafından doldurulmamış olabilir. Bu yerlere “boşluk“ adı verilir. Bir atomun bitişik pozisyondaki bir boşluğa sıçrayarak atlamasına boşluk mekanizmasıyla difüzyon denir. Boşlukların yer değiştirmesi atomların hareketinin tersi yöndedir(Şekil 4.5 (Halka Mekanizması)). Atomu hareket ettirmek için gerekli distorsiyon enerjisi küçüktür. Örneğin, bir demir atomunun bitişik bir boşluğa hareket ettirmek için demir kristal kafesine verilecek distorsiyon enerjisi, karbon atomunu aynı kafeste bir ara yerden diğer ara yere hareket ettirmek için gerekli olan enerjiye eşittir. Demir atomlarının karbon atomlarına oranla daha yavaş difüze etmelerinin nedeni yeterli boşluk oluncaya kadar belli bir süre beklemek zorunda olmalarıdır(Fidan, 2006).

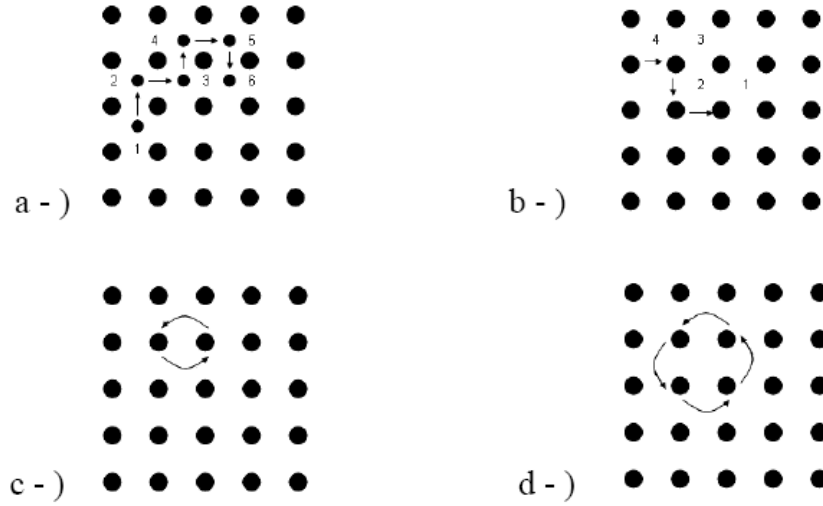
#### **4.1.4 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması**

Enerji nedeniyle iki atomun karşılıklı olarak doğrudan yer değiştirme olasılığı düşüktür (Şekil 4.5 c). Metallerde iç yapı kusurları oldukça yüksek olduğundan gerekli de değildir. Çünkü her atom iki atom çapı kadar hareket edebilir. Ayrıca mekanizmanın oluşabilmesi için kafesin bölgesel olarak çarpılması da gereklidir(Fidan,2006).

#### **4.1.5 Halka Mekanizması**

1940’larda çarpılma ve Kirkendall etkisinden ötürü halka mekanizmasının çok güç olduğu kanıtlanmıştır. 1950’ de Zeger iki atomun karşılıklı yer değiştirmesi yerine üç veya dört atomun dairesel düzende yer değiştirmesi sonucu, çok fazla çarpılma oluşmadan difüzyonun mümkün olabileceğini ileri sürmüştür. Bu sıkı yapıli kafesler için söz konusudur. Birbirine değerek bir halka halinde bulunan atomlar aynı anda ve aynı yönde hareket ederek birbirlerinin yerini alabilirler. Bu tür yayını çok büyük enerji gerektirdiğinden ancak ergime sıcaklığına yakın bölgelerde oluşabilir. Bu model Şekil 4.5’de gösterilmiştir(Fidan, 2006; Onaran, 2006)..





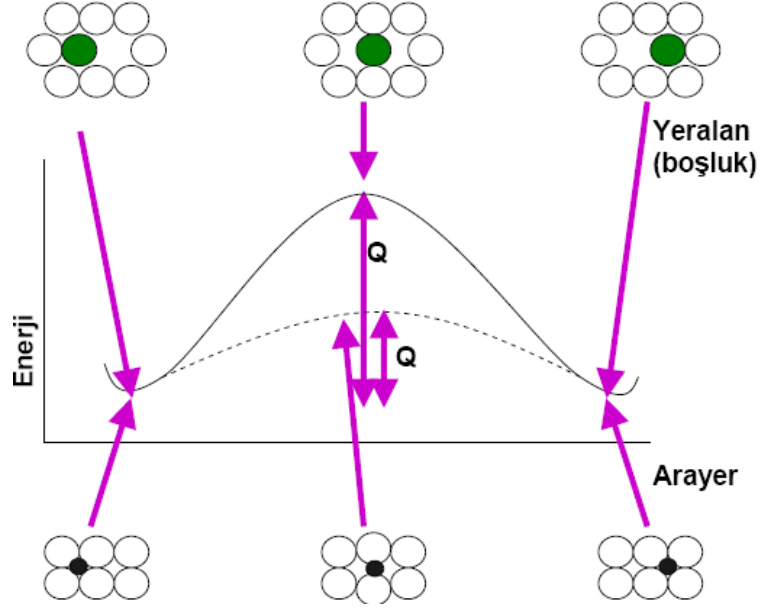
Şekil 4.5 Kristal kafeste atomların hareket mekanizmaları (Fidan,2006).

#### 4.2 Aktivasyon Enerjisi

Difüze eden bir atom yeni yerine ulaşmak için komşu atomlarını sıkıştırıp geçmek zorundadır. Bunun gerçekleşebilmesi için atomların yeni yerine geçmesini sağlayacak enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum Şekil 4.6' de yeralan ve arayer difüzyonu için şematik olarak gösterilmiştir. Burada atom, orijinal olarak nispeten kararlı konumda ve düşük enerjili haldedir. Yeni bir noktaya hareket etmek için, enerji engelini aşmak zorundadır. Bu gerekli olan enerjiye "aktivasyon enerjisi" denir ve "Q" ile gösterilir. Bu enerji engeli sınırını aşması için atomun ısıtılması gerekir. Normal olarak bir arayer atomunun, komşu atomları geçmek için sıkıştırması daha az enerjigerektirir. Bunun sonucu olarak da, arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi, yeralan difüzyonu için gerekli olandan daha azdır. Düşük bir aktivasyon enerjisi daha kolay bir difüzyon gerçekleştiğini gösterir(Fidan, 2006).

#### 4.3 Kararlı Hal Difüzyonu ( 1.Fick Kanunu)

Birinci Fick kanunu ile sabit bir A kesitinden geçen, difüze eden malzeme miktarının belirlenmesi yapılabilir. Birinci Fick kanunu olarak bilinen matematiksel ifade ile aşağıdaki gibi belirtilmiştir.



Şekil 4.6 Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q) değişimi (Akbulut, 2006)

$$J_A = - D (dc/dx) \quad (3.1)$$

Eğer bileşim gradyanı  $dc/dx$  sıfırdan farklı bir değerde ise, bir difüzyon hızı mevcuttur,  $dc/dx=0$  ise bileşim değişimi yoktur. Burada  $dc/dx$ , bileşim gradyanında  $x$  mesafesindeki difüzyon miktarıdır.  $J$ ; akı veya akış, yani metal kütlelerinin ( $m$ ),  $t$  zamanı içerisinde  $A$  yüzeyinden bu düzleme dik olarak difüzyon doğrultusunda yer değiştirme değeridir.  $D$ ; difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ), ve  $dc/dx$  yoğunlaşma gradyanıdır ( $m^3/m$ )<sup>-1</sup>. Difüzyon esnasında atomların akışını etkileyen bir çok faktör vardır.

Akı, malzeme içerisinde bileşim homojen oluncaya kadar devam eder. Bileşim gradyanı da,  $t$  birim zamanda bir nokta boyunca difüzyon alanındaki değişimdir. Bileşim gradyanı, malzeme bileşiminin uzaklık ile nasıl değiştiğini gösterir,  $dc$ ;  $dx$  mesafesindeki bileşimdeki farktır (Fidan, 2006).

#### 4.4 Kararsız Hal Difüzyonu (2.Fick Kanunu)

Sabit bileşim farkında kütle akışının tespitinin zor olması ve metallerde difüzyon olaylarının çözümünde 1.Fick kanununun yetersiz kalması dolayısıyla, difüzyon katsayısının deneysel tespitinde ve bir çok kullanımda 2.Fick kanunundan yararlanılmaktadır. 1.Fick kanununun 2.Fick kanununa dönüştürülmesi için, aralarında  $dx$  kadar mesafe bulunan iki paralel yüzeyle sınırlandırılmış hacim elemanı kullanılır. Bu durumda bileşim  $x$  ve  $t$ 'ye bağımlı kalacağından, bir çok pratik problemler için şu matematiksel ifade kullanılır;

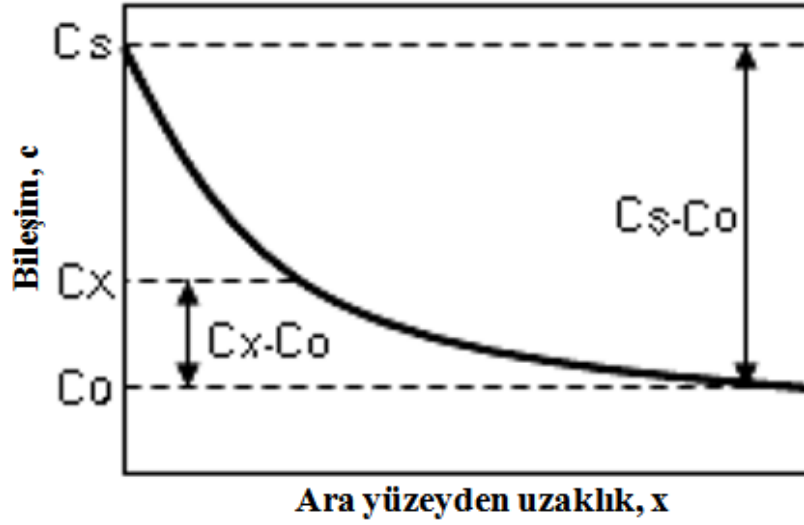
$$dc/dt = D d^2c / dx^2 \quad (3.2)$$

Bu denklemin çözümü bazı sınır değerlerine bağlıdır ve bu da;

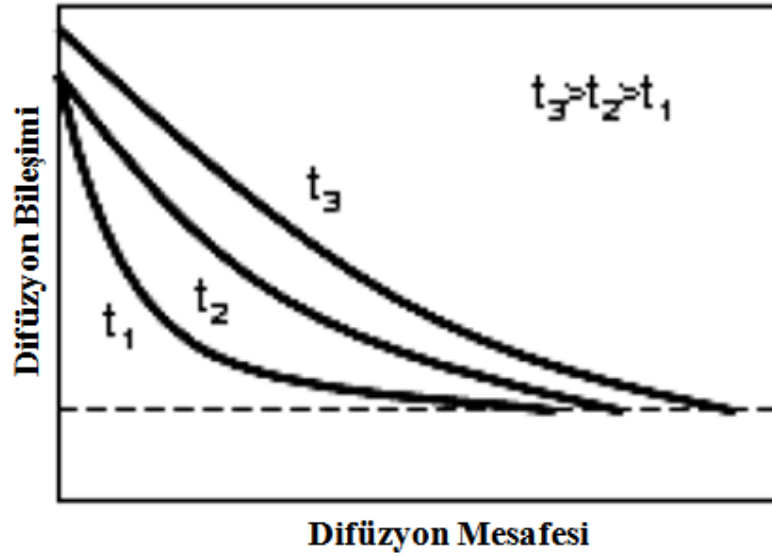
$$(C_s - C_x) / (C_s - C_o) = \text{erf} (x / (2\sqrt{Dt})) \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;  $C_s$ : yüzeydeki bileşim,  $C_x$ : yüzeyden veya ara kesitten  $x$  kadar mesafedeki bir noktanın yoğunluğu,  $C_o$ : difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu,  $x$ :  $C_x$ 'in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı,  $D$ : ortak difüzyon katsayısı,  $t$ : difüzyon süresi, erf: hata fonksiyonudur.

Bu eşitlikte verilen bileşim parametreleri Şekil 4.7' de bileşim profili olarak görülmektedir. Burada bileşim ve difüzyon mesafesi arasındaki ilişki görülmektedir. Ayrıca difüzyon mesafesinin bileşime bağlı olarak süreyle değişimi de Şekil 4.8' de verilmiştir. Burada sıcaklığın artması ile birlikte birim alanda difüzyon miktarının arttığı görülmektedir(Callister, 2001)



Şekil 4.7 Kararsız hal difüzyonu için bileşim profili(Fidan, 2006)



Şekil 4.8 Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan bileşim profili(Fidan, 2006)

2.Fick kanunu zaman ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme yüzeyine difüze eden atomların bileşimini hesaplamayı sağlar. Burada difüzyon katsayısı  $D$ 'nin sabit ve yüzeyde difüze eden atomun bileşimi  $C_s$  ve malzemede  $C_o$  değişmeden sabit kalmasıyla denklemin çözümü elde edilir. Bu kanunun uygulanması,  $D$  sabit kaldıkça, değişik şartlarda aynı bileşim profilinin elde edilebilmesidir. Bu özellik, belirli bir ısıtma işlemin uygulanabilmesi için gerekli zamanda, sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlamaktadır(Fidan, 2006).

## 4.5 Difüzyonu Etkileyen Faktörler

### 4.5.1 Sıcaklık

Sıcaklık difüzyonu etkileyen en önemli parametredir. Mesela  $\alpha$ -Fe' sinde Fe' nin difüzyonu için (kendi kendine) 500°C' den 900°C' ye sıcaklık arttırıldığında yaklaşık olarak difüzyon miktarı 106 kat artar. ( $3.0 \times 10^{-21}$  ' den  $1.8 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>/s) Çizelge 4.1'deki değerlere bakıldığında sıcaklığın difüzyon üzerindeki etkisi görülmektedir(Callister, 2001; Fidan, 2006)

Aşağıdaki formüle göre difüzyon miktarı ilişkilendirilirse,

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (3.4)$$

Burada;  $D_0$ ; yayınan atomların titreşim frekansına bağlı olarak difüzyon katsayısı (cm<sup>2</sup>/s), Q: Aktivasyon enerjisi (J/mol, Kcal/mol), R: Gaz sabiti, (8.314 J/mol.K), T: mutlak sıcaklık (K).

Bir malzemenin sıcaklığı artırıldığı zaman, difüzyon katsayısı ve atomların akısı (J) artar. Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu için sağlanan enerji, atomların aktivasyon enerjisi engelini aşmasını ve daha kolaylıkla yeni kafes yerlerine hareket etmesini sağlar.

Düşük sıcaklıklarda, genellikle mutlak ergime sıcaklığının ( $T_m$ ) yaklaşık 0,4  $T_m$  katı altında difüzyon çok yavaştır ve etkili olmayabilir. Bu nedenle seramiklerin işlemi ve metallerin ısıtılması işlemi, yüksek sıcaklıklarda yapılır. Bu sıcaklıklarda, atomlar reaksiyonlarını tamamlamak veya denge şartlarına ulaşmak için daha hızlı hareket ederler(Kurt, 1996).

Difüzyon sabitinin her 20°C' lik sıcaklık artışı ile iki kat büyüdüğü düşünüldüğünde, sıcaklığın difüzyon da ne kadar etkili olduğu görülür.

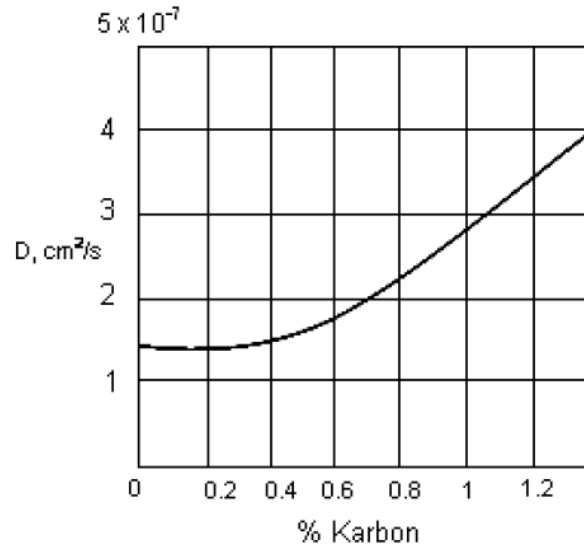
Çizelge 4.1 Bazı malzemelerde, difüzyon hızının sıcaklıkla değişimi(Smith, 1990)

| Difüze olan Element | Ana Metal | Do (m <sup>2</sup> /s) | Aktivasyon Enerjisi | Hesaplanan Değerler |                      |
|---------------------|-----------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|                     |           |                        | Q (kj/mol)          | T (°C)              | D(m <sup>2</sup> /s) |
| Karbon              | HMK Demir | $6,2 \times 10^{-7}$   | 80                  | 500                 | $10^{-12}$           |
| Karbon              | HMK Demir | $6,2 \times 10^{-7}$   | 80                  | 1000                | $3 \times 10^{-11}$  |
| Çinko               | Bakır     | $2,4 \times 10^{-5}$   | 189                 | 500                 | $4 \times 10^{-18}$  |

|       |           |                      |     |      |                     |
|-------|-----------|----------------------|-----|------|---------------------|
| Çinko | Bakır     | $2,4 \times 10^{-5}$ | 189 | 1000 | $5 \times 10^{-13}$ |
| Bakır | Alüminyum | $6,5 \times 10^{-5}$ | 136 | 500  | $4 \times 10^{-14}$ |
| Bakır | Alüminyum | $6,5 \times 10^{-5}$ | 136 | 1000 | $10^{-10}$          |

#### 4.5.2 Bileşim

Bileşim, malzeme kompozisyonunun mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Fakat genel olarak bileşimin değişmesi ile difüzyon katsayısının değerinde değişmeler olur. Bileşimin etkisi arayır katı eriyiklerinde daha kolay incelenebilir. Çünkü bu durumda ergiten atomların yayınmasının tesiri ihmal edilebilir. Karbonun östenit içerisinde söz konusu sıcaklıkta eriyebilmesinin sınırı olan % 1,3 C'a kadar difüzyon katsayısında az bir değişme olduğu bilinmektedir(Kurt, 1996). D'nin büyük ölçüde bileşimine bağlı olduğu sistemlerde bile, difüzyonun küçük bir bileşim alanı içerisinde olmak şartı ile D değerinin sabit kabul edilmesi yanlış olur.



Şekil 4.9 927°C 'de demir içinde difüze olan karbon için difüzyon katsayısının konsantrasyonla değişimi(Fidan, 2006)

#### 4.5.3 Kristal Yapısı

Kristal kafes yapısının sıcaklıkla değişiminin önemi nedeni ile kristal yapının değişiminin ergimiş demirde difüzyon derecesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda HMK yapıdan YMK yapıya allotropik bir dönüşüm ile kristal yapıdaki karbon ergitebilirliğini değiştirmiştir. Belli bir sıcaklıkta demir atomlarının difüzyon hızı ferrit'te (HMK), östenit'ten (YMK) yaklaşık  $10^2$ ,  $10^3$  fazladır.

Kristal dokusunun bir başka etkisi de, ana metalin tek bir kristali içinde kristal yönüyle difüzyon katsayısının değişmesidir. Kübik metallerde bu tür anizotropi görülmez. Ancak bismut (eşkenar dörtgen, aralıklı ağ), karbon eksenine paralel ve dikey yönlerde ölçülmüş öz difüzyon katsayılarında yaklaşık binde bir gibi bir oran ortaya çıkmıştır(Oğuz, 1990).

#### 4.5.4 Alaşım Elementleri

Metallerde alaşım elementleri ya da empüriteler, difüzyon katsayısını çok fazla etkiler. Demir alaşımlarının ısıtılma işlemi, diğer metallere nazaran daha fazla alaşım elementlerinden etkilenmektedir. Demir atomlarının yer değiştirme kabiliyetine, alaşım elementlerinin etkisi oldukça önemlidir ve karbon çok kuvvetli etki yapar. Östenitte karbon miktarı yükseldiğinde, Q ve Do değerlerinin azalması ile difüzyon artar. Krom ve vanadyum gibi alaşım elementleri de difüzyon katsayısını belirgin olarak iyileştirirler. Farklı bir yer değiştirme mekanizmasına sahip arayer atomu olarak bor, hidrojen, karbon, azot ve oksijenin demirdeki difüzyon kabiliyetleri oldukça iyidir. Hidrojenin küçük atom çapı, kafeste büyük bir hareketliliğe imkan sağlar.

Kuvvetli karbür teşekkül ettiren elementler, Q değerini önemli ölçüde arttırırlar ve bundan dolayı, karbonun östenit içerisinde difüzyonunu yavaşlatırlar. En önemli etkiyi krom ve volfram oluşturur. Silisyum, alüminyum ve manganın önemli bir etkisi yoktur. Nikel ve kobalt ise, karbonun östenit içerisindeki difüzyonunu iyileştirirler(Fidan, 2006).

#### 4.5.5 Tane Boyutu

Tane sınırı difüzyonu, tane içi difüzyonundan daha hızlı olduğundan küçük tane yapısına sahip malzemelerde, difüzyon hızının artması beklenir. Bununla birlikte, difüzyon hesaplamaları yapılırken tane boyutu hesaba katılmamaktadır.

Tane sınırı çevrelerinde, metal kafesinin en azından iki ile üç bölgesinde düzensizlikler mevcuttur. Bu nedenle tane sınırları, belirli bir boş hacim içerirler ve difüzyon için ayrıca enerjiye gerek yoktur. Tane sınırı boşlukları daha büyük olduğu için, aktiveleştirme enerjisi hacim difüzyonuna nazaran yaklaşık yan değerdedir. Tane sınırı difüzyonunun etkin olabildiği durumlarda, düşük sıcaklıklarda difüzyon hızlı olabilir. Tane sınırı için belirtilen esaslar, benzer şekilde dislokasyonlar için de geçerlidir.

Dislokasyonlarda da tane sınırlarına benzer olarak etkinliğin artmasıyla, gerekli aktiveleştirme enerjisi yan değerine düşer. Bu nedenle, dislokasyonların da özellikle düşük sıcaklıklarda, difüzyon reaksiyonları için önemi fazladır. Ayrıca plastik deformasyon sonrası dislokasyon yoğunluğunun artması difüzyonu kolaylaştırır. Bu açıklamalardan da anlaşılabilceği gibi, difüzyon katsayısı  $D$ 'nin kullanılmasında, malzemenin hangi aşamalardan geçtiğine dikkat etmek gerekir(Fidan, 2006).

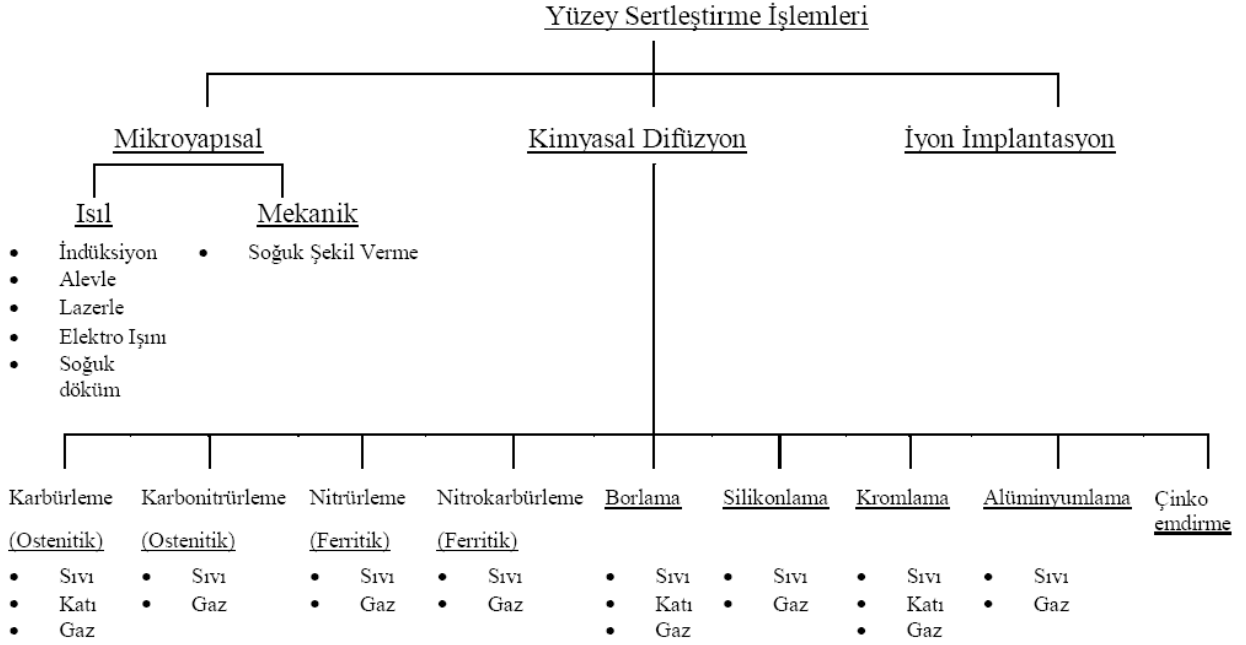


## 5. DİFÜZYON İLE YAPILAN YÜZEY İŞLEMLERİ

### 5.1 Giriş

Malzeme yüzeyinin değişikliğine yol açan ısı destekli difüzyon ile atom taşınmasında katı hal işlemlerinin iki sınıfı ortaya çıkmaktadır. Her iki işlem de termokimyasal işlemler olarak adlandırılırlar. Birincisinde, yüzeye gönderilen küçük çaplı atomların difüzyonu ile ana malzemede arayer katı çözelti oluşumu ortaya çıkar ve bu durumda bazen çok ince çökelti şeklinde kimyasal bileşiklerin oluşumu meydana gelir, Değişime uğramış bölge matris ile benzer yapıdadır. Karbürleme ve karbonitrüleme buna örnek olarak gösterilebilir. İkincisinde ise, ana malzemenin atomları ile difüzyona uğrayan atomlar arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelir ki bu da yüzeyde farklı bir tabakanın ortaya çıkışına neden olur. Bu işleme örnek olarak nitrüleme, nitrokarbürleme, borlama ve kromlama verilebilir. Termokimyasal işlem bir difüzyon prosesidir. Termokimyasal işlem metotları, difüze olan elementin sağladığı aktif fazın fizikokimyasal karakteristiklerine göre katı fazdan, sıvı fazdan, gaz fazından ve plazma fazından doyurma şeklinde sınıflandırılmaktadır. Termokimyasal işlemler veya difüzyonlu kaplamalar çöktürülen elementin metal ve ametal oluşuna göre iki gruba ayrılır (Caruta, 2005 ; Pazarlıoğlu, 2006; [12]).

- Ametallerle termokimyasal işlemler (karbürleme, nitrüleme, nitrokarbürleme ve borlama)
- Metallerle termokimyasal işlemler (alüminyumlama, kromlama, silisyumlama)



Şekil 5.1 Isıl ve Kimyasal Yüzey İşlemlerinin Sınıflandırılması (Çelik vd., 2002)

## 5.2 Ametallerle Termokimyasal İşlemler

### 5.2.1 Karbürleme

Karbürleme sağladığı üstün mekanik özellikler sebebiyle çeliklere uygulanan ısıl işlem tekniklerinden biridir. Yüzey sertleştirme prensipleri yüzyıllar önce sementasyon prosesiyle işlenmiş demirin çeliğe dönüşümünde kullanılmıştır. Genelde karbürleme prosesinde % 0,10-0,25 C içeren düşük karbonlu çelikler 900-1100 °C arasında değişen yüksek sıcaklıklara ısıtılırlar. Demirin 910 °C üzerinde yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapısına sahip olması karbon atomlarının demire yayınmasını sağlar. Yeterli derinlikte karbonca zenginleştirilmiş tabaka meydana gelinceye kadar bu sıcaklıkta tutulur. Sonuçta demir yüzeyinde karbürlenmiş tabaka oluşturulur. Karbonca zengin tabaka daha sonra tekrar ısıtma ve su verme ya da karbürleme sıcaklığından direkt su verme ile sertleştirilebilir(Li vd., 2004; Tarakci vd., 2005).

Karbürleme yöntemleri, çeliğin ostenit sıcaklığına kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta karbon verici bir ortamda tutulması ve sonradan da esas sertleştirme işleminin uygulanmasından meydana gelmektedir. Karbürleme yöntemleri :

- a) Kutu karbürleme
- b) Sıvı karbürleme
- c) Gaz karbürleme
- d) Plazma karbürleme
- e) Vakum karbürleme

olmak üzere beş çeşittir.

Bu yöntemler karbonu gazın (atmosferik gaz, plazma, ve vakum karbürleme), sıvıların (tuz banyosu karbürleme), veya katı bileşiklerin (kutu karbürleme) kullanılmasıyla açığa çıkarır. Bütün bu yöntemlerin avantajları ve kısıtlamaları vardır fakat gaz karbürleme doğru olarak kontrol edilebildiği ve az sayıda özel işleme içerdiğinden geniş ölçekte üretim için en çok kullanılan yöntemdir(ASM International Handbook Committee, 1994).



Şekil 5.2 Bir AISI 8620 çeliğinden imal edilmiş olan otomobil dişlisinin karbürlenmiş ve havada soğutulmuş mikroyapı görüntüsü (Akbulut, 2006)

### 5.2.2 Karbonitrürleme

Karbonitrürleme kazandırdığı üstün mekanik özellikler nedeniyle çelikler için yaygın olarak kullanılan yüzey sertleştirme yöntemidir. Karbonitrürleme östenit fazında çeliğe azot ve karbon yayındırılmasına dayanan bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Östenit kompozisyonunun değiştirilmesi ve su verme işlemiyle martensit oluşturularak yüksek yüzey sertliği elde edilmesi yönleriyle karbürlemeyle benzerlik gösterir. Buna rağmen; azotun sertleşebilirliği

geliştirmesinden dolayı, önlemsiz su verme ve bunun sonucu daha az çarpılma ya da parçanın kırılma riskini azaltmaksızın yüksek alaşımlı karbürlenmiş çeliğin yüzey sertliğine eşit değerde düşük karbonlu çeliklerde yüzey sertliği elde edilir(ASM International Handbook Committee, 1994; Shen vd. , 2006)

Karbonitrürleme prosesi gaz atmosferlerinde veya tuz banyolarında uygulanabilmesine rağmen karbonitrürleme terimi daha çok gaz atmosferi altında yapılan bir işlem olarak bilinir. Temel olarak tuz banyosunda karbonitrürleme siyanür banyosunda yüzey sertleştirme ile aynıdır. Her iki proseste, azot sertleşebilirliği ve yüzey sertliğini geliştirir fakat karbonun difüzyonunu engeller.



Şekil 5.3 Karbonitrülenmiş ve yağda soğutulmuş AISI 1020 çeliğinin mikroyapı görüntüsü(Vander Voort G.F., 2004)

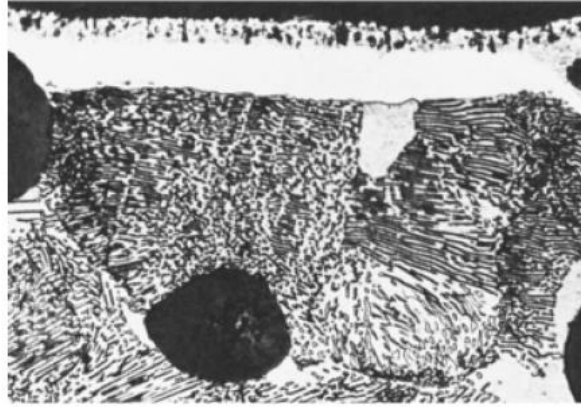
### 5.2.3 Nitrürleme

Nitrürleme; çelik ve demirlere yüzeye azot yayındırılarak sert nitrür tabakası oluşturmak suretiyle sertliği, aşınma ve korozyon direncini arttırmak için 500-550 °C arası yapılan bir termokimyasal yöntemdir. Nitrürleme sıcaklığında çelikler ferritik yapıdadır. Nitrürleme yüzeye bir element yayındırılması bakımından karbürlemeye benzerdir. Nitrürleme de karbon yerine azot, östenit bölgesinde değil ferrit bölgesinde yayındırılır. Nitrürleme östenit fazına ısıtılıp, ardından su vermek suretiyle martensit oluşumunu içermediği için minimum distorsiyon ve mükemmel boyutsal kontrol ile gerçekleştirilebilir. Nitrürleme yöntemleri :

- 1) Gaz Nitrürleme
- 2) Sıvı Nitrürleme
- 3) Plazma(iyon) Nitrürleme

olmak üzere üç çeşittir. Plazma nitrürlenme, gaz nitrürlenmeye oranla daha hızlı nitrürlenmeye imkan vermektedir(ASM International Handbook Committee, 1994; Copola vd. , 2002; Wang vd. , 2005).

Nitrürlenmiş çelikler genelde orta karbonlu çeliklerdirler ve alüminyum, krom, vanadyum ve molibden gibi güçlü nitrürlendirici elementler içerirler. En önemli sertleşme % 1 Al içeren alaşımlı çelikte elde edilmiştir. Bu çelikler nitrürlendiğinde, alüminyum AlN partikülleri oluşturur. Bu partiküller ferrit latisini gerer ve güçlendirilmiş dislokasyonları oluşturur. Ayrıca titanyum ve krom da kabuk sertliğini arttırmasına rağmen, kabuk derinliği alaşım elementi içeriğinin artmasıyla azalır. Mikroyapı da nitrürlenebilirliği etkiler çünkü ferrit azotun difüzyonunu kolaylaştırırken, düşük karbid içeriği hem difüzyonu hem kabuk sertliğini kolaylaştırır. Genellikle ısıtıl işlem görmüş (su verilmiş ve temperlenmiş) alaşım çelikleri nitrürlenir(ASM International Handbook Committee, 1994).

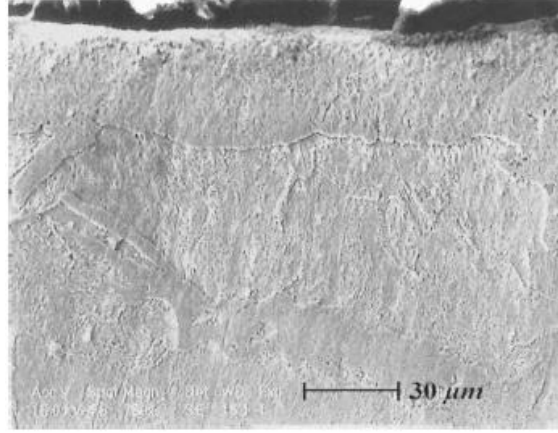


Şekil 5.4 570 °C'de 3 saat sıvı ortamda nitrürlenmiş ve su verilmiş küresel grafitli dökme demirin mikroyapı görüntüsü(Vander Voort G.F. , 2004).

#### 5.2.4 Nitrokarbürleme

Nitrokarbürleme ilk olarak 1950'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Nitrokarbürleme alaşım çeliklerine, takım çeliklerine ve paslanmaz çeliklere; sertliği, aşınma ve korozyon direncini arttırmak için uygulanan; azot ve karbonun metalik alaşımlar içerisinde yüksek sıcaklıklarda difüzyonuna dayanan bir termokimyasal işlemdir(Wang vd. , 2004; Jaoul vd. , 2005; Mirjani vd.,2008).

Karbon ve azotun ferrit fazında difüze olmasıyla yüzeyde karbonitrürlerden oluşan ince bir beyaz tabaka meydana gelir. Azotun altlık malzemesine difüzyonu yorulma direci için gereklidir. Kabuk derinlikleri incedir fakat konvansiyonel nitrürleme ile kıyaslayınca kabarmaya karşı azalmış eğilimi vardır. Çeliklerin mekanik özelliklerini geliştirmek için yapılan ferritik nitrokarbürleme gaz veya plazma(iyon) yöntemleriyle uygulanabilir(ASM International Handbook Committee, 1994).



Şekil 5.5 570 °C’de 8 saat gaz ortamında nitrokarbürlenmiş C60W çeliğinin SEM görüntüsü(Mirjani vd. , 2008)

Çizelge 5.1 Difüzyon işlemlerinin tipik karakteristikleri (ASM International Handbook Committee, 1994).

| Proses            | Yayınan Atom | Proses Sıcaklığı (°C) | Tipik yüzey derinliği | Sertlik HRC | Tipik altlık metalleri  | Proses Karakteristikleri                                          |
|-------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Karbürleme</b> |              |                       |                       |             |                         |                                                                   |
| Kutu              | C            | 815-1090              | 125 $\mu$ m-1.5 mm    | 50-63       | Düşük karbonlu çelikler | Düşük ekipman maliyeti, kabul derinliğini kontrol edememe zorluğu |
| Gaz               | C            | 815-980               | 75 $\mu$ m-1.5 mm     | 50-63       | Düşük                   | İyi kabuk kontrolü,                                               |

|                        |                          |          |                            |       |                                                       |                                                                                               |
|------------------------|--------------------------|----------|----------------------------|-------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        |                          |          |                            |       | karbonlu<br>çelikler                                  | sürekli operasyonlar<br>için uygun, iyi gaz<br>kontrolü gerekli.                              |
| Sıvı                   | C                        | 815-980  | 50 $\mu$ m-1.5<br>mm       | 50-65 | Düşük<br>karbonlu<br>çelikler                         | Kutu ve gaz<br>proseslerine göre<br>daha hızlı, tuz<br>banyoları sıklıkla<br>bakım gerektirir |
| Vakum                  | C                        | 815-1090 | 75 $\mu$ m-1.5<br>mm       | 50-63 | Düşük<br>karbonlu<br>çelikler                         | Mükemmel proses<br>kontrolü, gaz<br>karbürlemeden daha<br>hızlı, yüksek<br>ekipman maliyeti   |
| <b>Nitrürleme</b>      |                          |          |                            |       |                                                       |                                                                                               |
| Gaz                    | N ve azot<br>bileşikleri | 480-590  | 125 $\mu$ m-<br>0.75<br>mm | 50-70 | Alaşımli,<br>nitrürlenmiş ve<br>paslanmaz<br>çelikler | Su verme<br>gerekirmez, düşük<br>distorsiyon, yavaş<br>proses                                 |
| Tuz Banyosu            | N ve azot<br>bileşikleri | 510-565  | 2.5 $\mu$ m-<br>0.75<br>mm | 50-70 | Demirsi<br>Metaller,dökme<br>demirler                 | <25 $\mu$ m den küçük<br>ince sert yüzeyler<br>için, beyaz yüzey<br>yok,                      |
| İyon                   | N ve azot<br>bileşikleri | 340-565  | 75 $\mu$ m-<br>0.75<br>mm  | 50-70 | Alaşımli,<br>nitrürlenmiş ve<br>paslanmaz<br>çelikler | Gaz nitrürlemeden<br>daha hızlı, beyaz<br>tabaka yok, yüksek<br>ekipman maliyeti              |
| <b>Karbonitrürleme</b> |                          |          |                            |       |                                                       |                                                                                               |
| Gaz                    | C ve N                   | 760-870  | 75 $\mu$ m-<br>0.75<br>mm  | 50-65 | Düşük<br>karbonlu çelik,<br>düşük karbonlu            | Karbürlemeden daha<br>düşük sıcaklık(az<br>distorsiyon),                                      |

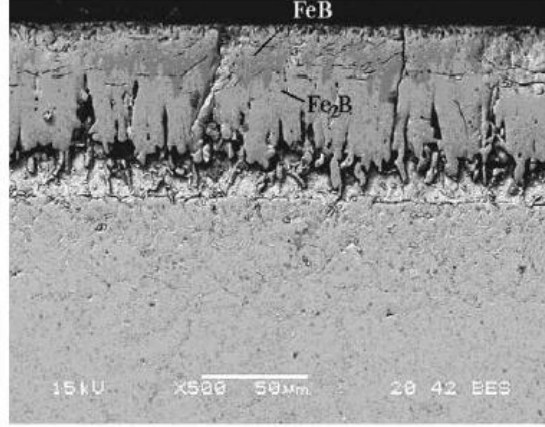
|                         |        |         |                    |       |                                  |                                                                                                        |
|-------------------------|--------|---------|--------------------|-------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         |        |         |                    |       | alaşımlar,<br>paslanmaz<br>çelik | karbürlemeden biraz<br>daha yüksek sertlik,<br>gaz kontrolü kritik                                     |
| Sıvı                    | C ve N | 760-870 | 2.5-125<br>$\mu$ m | 50-65 | Düşük<br>karbonlu<br>çelikler    | Kritik olmayan<br>parçalarda ince<br>yüzeyler için iyi,<br>yığımlı proses, tuz<br>kullanım problemleri |
| Nitro-<br>karbürizasyon | C ve N | 480-590 | 2.5-25 $\mu$ m     | 50-65 | Düşük karbonlu<br>çelikler       | Düşük karbonlu<br>çeliklerde ince yüzey<br>için düşük distorsiyon<br>prosesi, çoğu proses<br>özeldir   |

### 5.2.5 Borlama

Borlama, bor atomlarının iş parçasının yüzeyine difüze olmasıyla parçaların yüzeylerinde borür tabakası oluşturmak suretiyle, aşınma ve korozyon direncini arttırmak amacıyla yapılan yüzey reaksiyonları ve difüzyon kontrollü bir termokimyasal işlemdir(Lee vd., 2003; Spence vd., 2004).

Bor atomları altlık malzemenin yüzeyine kolayca difüze olarak yüzeyde; proses sıcaklığı, altlık malzemesinin kimyasal kompozisyonu ve borlama süresi gibi parametrelere bağlı olarak yüzeyde FeB, FeB<sub>2</sub> gibi borürler oluştururlar. Proses sıcaklığı 700-1000 °C arasındadır. Borlanmış çeliklerin sertlikleri 1650-2000 HV arasında değişir. İşlem süresi 1-12 saat arasında değişir. Karbon çeliklere, düşük alaşımlı çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere ve nikel bazlı alaşımlara uygulanabilir(Genel, 2005).





Şekil 5.6 Çelik yüzeyinde borlama ile oluşturulan FeB ve Fe<sub>2</sub>B borür tabakalarının SEM görüntüsü(Genel, 2005).

Bor verici katı toz, pasta, sıvı veya gaz ortamlarda gerçekleştirilir. Ayrıca gaz ortam teknikleri altında da sıralayabileceğimiz plazma pasta borlama ve akışkan yataklı borlama, diğer termokimyasal yöntemlerdir. Borlama yöntemleri:

- 1) Katı Borlama
- 2) Pasta Borlama
- 3) Sıvı Borlama
- 4) Gaz Borlama
- 5) Plazma Borlama

olmak üzere beş çeşittir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD), iyon implantasyonu veya plazma püskürtme gibi termokimyasal olmayan yöntemler ile de malzeme üzerinde bor tabakası oluşturulabilir(Uluköy ve Can, 2006).

#### 5.2.5.1 Borlamanın Üstünlükleri

- Yüksek sıcaklıklarda (nitrülenmiş çeliklerin sertliğini koruyamadığı) bor tabakası sertliğini korur.
- Borlama, demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon dayanımını gerek alkali ortam gerekse seyreltik asit çözeltisi içerisinde korur ve bu özelliği sayesinde endüstride geniş bir uygulama alanı bulur.

- Borlanmış yüzey 850 °C'ye kadar oksidasyona dayanıklıdır.
- Oksitleyici ve korozyif ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır(Uluköy ve Can, 2006).

#### **5.2.5.2 Borlamanın Kısıtlamaları**

- Gaz sementasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin, borlama işlemine göre işletme giderleri daha azdır ve uygulanmaları daha kolaydır.
- Karbürleşmiş veya nitrürlenmiş çeliklere göre, borlanmış alaşımlı çeliklerin temas yorulma dayanımı (Pullanma dayanımı) düşüktür.
- İşlem sonucunda parçanın ölçülerinde (borlama tabakasında % 5-25'i kadar hacim genişlemesi olduğu için) değişimler olur.
- Yüksek hız çeliklerinin sertleştirme sıcaklıkları genellikle 1150 °C'den fazla olduğu için, borlamaya uygun değildir(Uluköy ve Can, 2006).

Çizelge 5.3 Çeşitli Yüzey İşlemleriyle Elde Edilebilecek Yüzey Sertlikleri(Uluköy ve Can,2006).

| 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        |
| WC+Co                                                           | 1160–1820        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> seramikler     | 1483             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC+ZrO <sub>2</sub> seramikler | 1730             |
| TiN                                                             | 2000             |
| TiC                                                             | 3500             |
| SiC                                                             | 4000             |
| B <sub>4</sub> C                                                | 5000             |
| Elmas                                                           | >10000           |

### 5.3 Metallerle Termokimyasal İşlemler

#### 5.3.1 Silisyumlama

Silisyumlama parçaların yüzeylerinde silisyumca zenginleştirilmiş difüzyon tabakaları elde etmeyi amaçlayan bir termokimyasal yöntemdir. Bu yöntemde yüzey silisyumca doyurulur. Silisyumlama 900-1000 °C arası sıcaklıklarda yapılır. Silikon kaplama kalınlığı 0,6-1,4 mm'dir(Markos, 2010).

Toz silisyumlama, sıvı faz silisyumlama ve buhar fazında silisyumlama olmak üzere çeşitli silisyumlama yöntemleri vardır. En çok kullanılan ve en ucuz olan yöntem toz silisyumlama. Basit olarak, parçanın toza gömülmesi ve uygun sıcaklığa ısıtılması basamaklarını kapsar. Saf silikon tozları ya da silikon toz karışımları, inert dolgu gereçleri ve aktivatörler silisyumlama aracı olarak kullanılabilirler. Silisyumlama esnasında halidler gibi aktivatörler silisyum tozuyla reaksiyona girerek gaz durumunda silisyum halid oluştururlar. Silisyum halid numune yüzeyine difüze olarak, dekompoze olmak suretiyle silisyumu yüzeyde biriktirir. Maalesef, aktivatör ve

dolgu gereçlerinin kullanımı yüzeyde ciddi bir kirlenmeye neden olur(Vojtech vd. , 2008).

Sıvı faz silisyumlama da basit olarak uygulanabilir. Altlık malzemesine uygun alaşım eriyiğinin (Al-Si gibi) temas ettirilmesiyle olur. Eriyik ve altlık malzemesinin reaksiyona girmesinden sonra kalan yapışkan eriyik kimyasal bir araçla çözündürölmek suretiyle temizlenir. Eriyik kompozisyonuna, reaksiyon sıcaklığına ve süresine bağılı olarak alüminyum ve silisyumca zengin bir sürü değışik yüzey tabakaları elde edilebilir. Buhar fazında yapılan silisyumlama işlemleri arasında en çok kimyasal buhar biriktirme (CVD) kullanılır. Bu yöntemle oluşturulan yüzeylerin uygulama alanı elektronik sanayidir(Vojtech,2008).

### **5.3.2 Kromlama**

Kromlama, bileşenlerin performansını ekonomik olarak arttırmak için uygulanan bir yüzey kaplama teknolojisidir. Demir alaşımları yüzeylerinde kromlama vasıtasıyla; yüzey sertliğini, aşınma ve korozyon direncini geliştiren krom, demir ve karbondan oluşan alaşımlı bir yüzey elde edilir(Wang vd. , 2005).

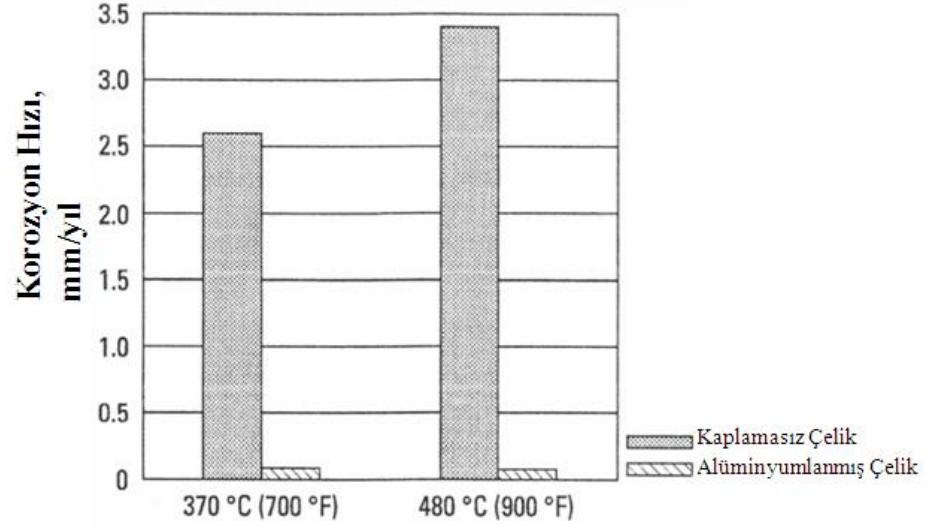
Kutu sementasyon, erimiş tuz tekniğı ve vakum kromlama gibi değışik kromlama prosesleri geliştirilmiştir. Kromlama prosesleri tipik olarak 1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda, 6-10 saat arasında değışen zamanlarda uygulanır. Kutu sementasyon prosesi en kolay ve en ucuz kromlama prosesidir. Fakat yüksek sıcaklık uygulaması olması sebebiyle, altlık malzemesinin mekanik özelliklerine zarar verici etki yapan tane büyümesine neden olduğı için işlem sıcaklığının düşürölmesi gerekmektedir(Wang vd. , 2005; Zhou vd. , 2008).

### **5.3.3 Alüminyumlama**

Alüminyumlama nikel ve demir bazlı alaşımlar gibi metalik malzemelere oksidasyon ve korozyon direncini geliştirmek için uygulanan bir tekniktir. Türbin kanatçıkları gibi yüksek sıcaklık ortamında çalışan parçalar için gereklidir. Yüksek alüminyum içeriğı işlem sırasında yüzeyde koruyucu oksit tabakasının oluşumunu sağlar. Tipik tabaka kalınlığı 10-100 µm 'dir. Alüminyumlanmış çelikler akkor gazların hareket halinde olduğı jet nozöüllerinde, ekzost borularında ve yanma odalarında kullanılır(Wang vd. ,2003; Kohlscheen vd., 2007).

Alüminyumlama, 950-1050 °C'de gerçekleştirilen düşük aktiviteli alüminyumlama ve 700-900 °C'de gerçekleştirilen yüksek aktiviteli alüminyumlama olarak ikiye ayrılmıştır. Düşük aktiviteli alüminyumlama için alüminyumlanmış tabakanın büyüme oranı, nikel ve demir gibi altlık

malzemenin elementlerinin difüzivitesiyle kontrol edilir. Düşük aktiviteli alüminyumlama işlem zamanını koruma için yüksek sıcaklıkta tutulmalıdır. Buna rağmen, yüksek aktiviteli alüminyumlama düşük sıcaklıklarda uygulanmalıdır çünkü alüminyum tabakası oluşumu yüksek aktiviteli alüminyum atomlarının altlık malzemesine difüzyonu tarafından kontrol edilmektedir(Wang vd., 2003)



Şekil 5.7 Alüminyumlanmış ve kaplanmamış 9Cr-1Mo çeliğinin korozyon hızlarının karşılaştırılması(Davis, 2001)

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1 Giriş

Bu çalışmada AISI 1010 ve AISI 1040 çelikleri yüzeyine nikel ve krom yayındırarak çeliklerin yüzey özelliklerinin değişimi amaçlanmıştır. Bunun için AISI 1010 ve AISI 1040 çelik yüzeyleri önce elektrolitik olarak nikel ve krom kaplanmıştır. Nikel ve krom kaplanan numuneler azot gazı atmosferi altında tüp fırınında 700 °C ve 800 °C’lerde 4 saat ısıtılma tabi tutulmuşlardır.

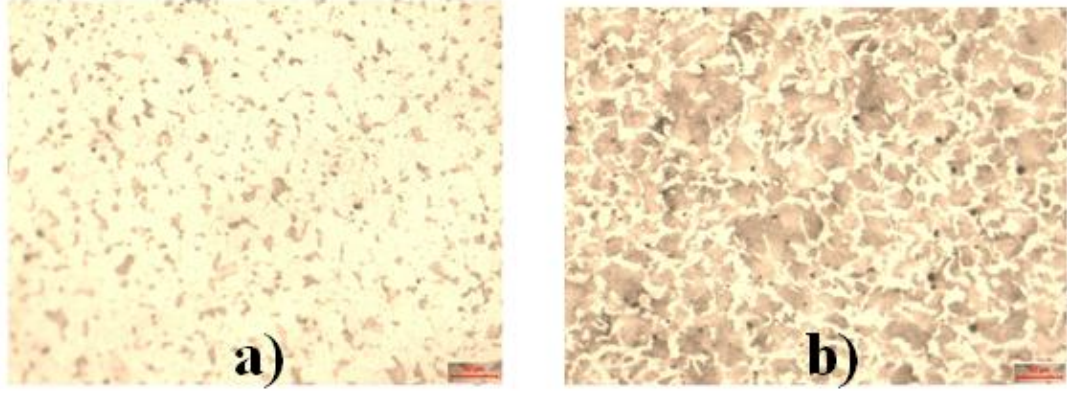
Daha sonra numunelerin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Difüzyon bölgesi taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Nikel ve kromun yayındırılmasının çeliklere ne gibi özellikler kazandırdığı araştırılmıştır. Bunun için mikrosertlik ve korozyon deneyleri yapılmıştır.

### 6.2 Deneylerde Kullanılan Numuneler

Deneylerde kullanılan 1010 ve 1040 kalite çelikler piyasadan çubuk şeklinde alınmıştır. Çeliklerin işlem öncesi kimyasal analizi yapılmış, sertlikleri ölçülmüş ve mikroyapısı incelenmiştir. Kimyasal analizi ve sertlikleri çizelge 6.1’de, mikroyapısı ise şekil 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 AISI 1010 ve AISI 1040 Çeliklerinin Kimyasal Analizleri

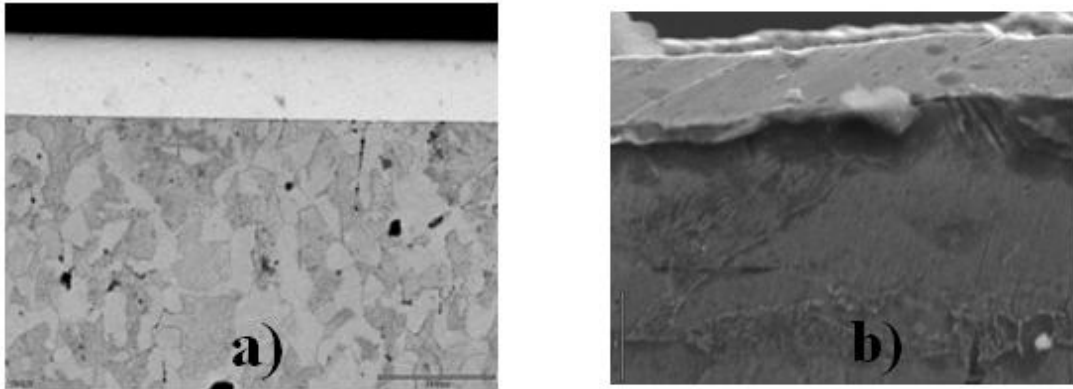
|           | AISI 1010 ve AISI 1040 çeliğinin kimyasal analizi sonuçları (%) |       |       |       |        |        | Sertlik Değeri (HV) |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|---------------------|
|           | Fe                                                              | C     | Si    | Mn    | P      | S      |                     |
| AISI 1010 | 98.28                                                           | 0.122 | 0.257 | 0.877 | 0.0132 | 0.0314 | 172 HV              |
| AISI 1040 | 97.82                                                           | 0.427 | 0.252 | 1.01  | 0.0257 | 0.0205 | 198 HV              |



Şekil 6.1 Çeliklerin mikroyapı görüntüleri a) AISI 1010 çeliği b) AISI 1040 çeliği

### 6.3 Numunelerin Elektrolitik Kaplanması

Çeliklerden elektrolitik kaplama için parçalar kesilmiş, kaplama öncesi bu parçaların yüzeyleri sırasıyla 60-120-180-220-320-400-600-800-1200 SiC zımpara kağıdı ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra numune yüzeyleri sırasıyla alümina ve elmas ile parlatılmış, yüzeylerinin temiz olması için numuneler sırasıyla saf su ve alkolden geçirilmiştir. Numunelerin elektrolitik nikel kaplamaları Ersan Galvano ve Kimya San. Tic. Ltd. Şti. tarafından, ve elektrolitik krom kaplamaları ise Yeni Yıldız Kromaj tarafından yapılmıştır. Nikel kaplanan yüzeylerde yaklaşık 30  $\mu\text{m}$ , krom kaplanan yüzeylerde yaklaşık 8  $\mu\text{m}$  kalınlık elde edilmiştir. Şekil 6.2’de çelik yüzeylerinde elde edilen krom ve nikel kaplamaların SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.2 Çelik yüzeylerine elektrolitik kaplanan nikel ve krom kaplamalarının SEM görüntüsü a) nikel kaplama b) krom kaplama

#### 6.4 Numunelerin Isıl İşlemi

Elektrolitik nikel ve krom kaplamaların çelik yüzeylerine yayındırılması amacıyla kaplanmış çelikler 700 °C ve 800 °C'lere ısıtılıp, fırında 4 saat tutulduktan sonra fırında soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin ısıtılma işlemi, oksitlenmeyi engellemek için azot gazı atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Bunun için Şekil 6.3'de görülen Protherm marka tüp fırını kullanılmıştır.



Şekil 6.3 Protherm marka tüp fırını

#### 6.5 Numunelerin Karakterizasyonu

##### 6.5.1 Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizleri

Isıl işleme tabi tutulan numunelerin metalografik inceleme yapılabilmesi için her bir numune kesitinden şekil 6.4'de görülen Metkon Micracut 150 marka hassas kesme cihazıyla kesilmiştir. Kesilen numuneler bakalite alınmış ve 1200 nolu SiC zımpara kağıdı ile zımparalanmış, alümina ve elmas ile parlatılmıştır. Numuneler %10'luk nital çözeltisiyle dağlanmıştır. Ayrıca nikel kaplanmış numuneler A-286 nikel alaşımlarının dağlanmasında kullanılan 15 ml HCl, 10 ml HNO<sub>3</sub>, 10 ml asetik asit içeren dağlayıcıyla da dağlanmıştır.

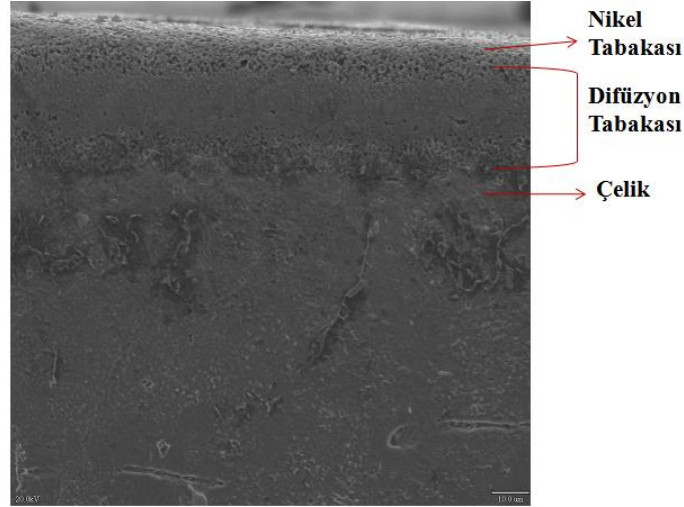




Şekil 6.4 Metkon Micracut 150 Marka Hassas Kesme Cihazı

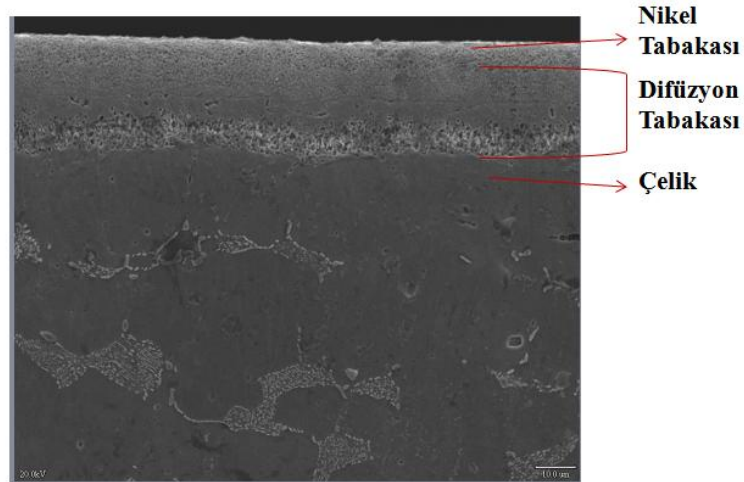
Daha detaylı numune analizi, difüzyon tabakasının belirlenmesi ve kimyasal analiz için SEM görüntülerinden yararlanılmış ve EDS analizleri yapılmıştır. Bunun için Jeol-5410 LV marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

AISI 1010 ve AISI 1040 çeliklerinin nikel ve krom kaplandıktan ve 700 °C ve 800 °C' lerde 4 saat ısıtıl işlem yapıldıktan sonraki mikroyapı görüntüleri taramalı elektron mikroskobunda çeşitli büyütme ve 20 kV enerjide ikincil elektronlardan ve geri saçılmış elektronlardan faydalanılarak elde edilmiştir. Nikel yayındırılmış numunelerde difüzyon tabakasının daha net belirlenebilmesi için 15 ml HCl, 10 ml HNO<sub>3</sub>, 10 ml asetik asit içeren dağlayıcıyla dağlanmıştır. Şekil 6.5-8 bu dağlayıcıyla dağlanmış nikel yayındırılmış çeliklerin taramalı elektron mikroskobunda ikincil elektronlardan faydalanılarak elde edilmiş mikroyapı görüntülerini vermektedir.



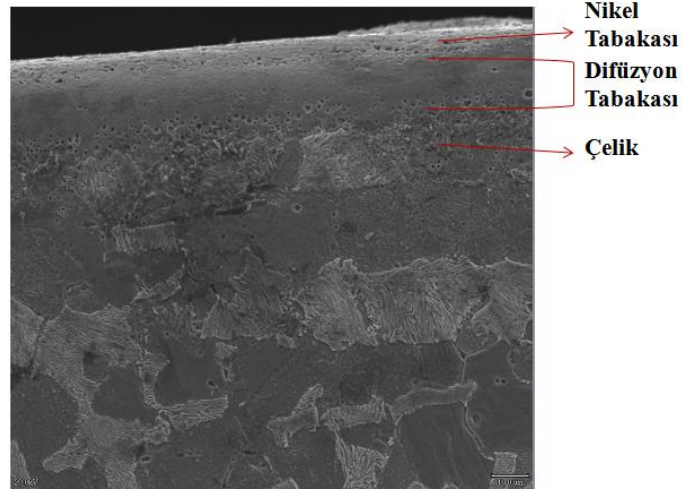
Şekil 6.5 800 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü

Şekil 6.5’de görüldüğü gibi nikel kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 800 °C’ de ısıtılmasıyla nikelin bir kısmı çelik içerisinde yayınmadan yüzeyde kalmıştır. EDS analizlerinden görüleceği gibi yüzeyden itibaren çeliğe doğru gidildikçe nikel oranı azalmış demir oranı artmıştır. Şekilde gösterilen kısma gelindiğinde nikel içeriğine rastlanmamış ve yayınmanın bu bölgeye kadar olduğunu göstermiştir. Yaklaşık olarak 32 µm difüzyon tabakası ölçülmüştür.

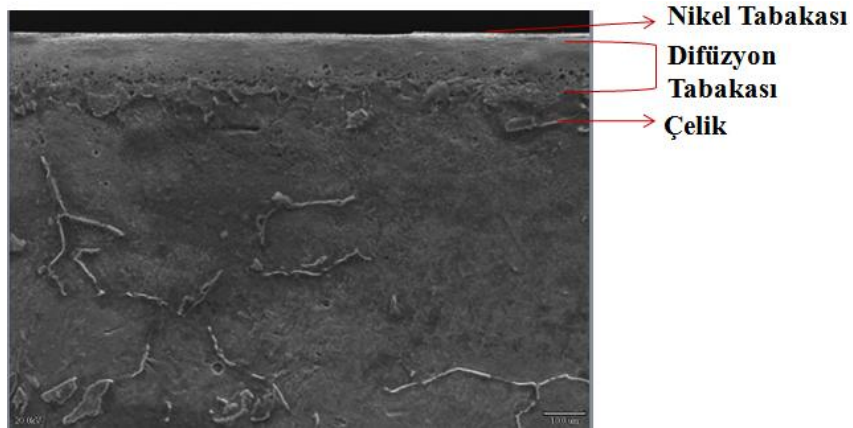


Şekil .6.6 700 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü

Şekil 6.6’de görüldüğü gibi yüzeyde yayınmadan kalan nikel mevcuttur. EDS analizlerinden bakıldığında yaklaşık olarak 20 µm kalınlığında difüzyon tabakası elde edilmiştir.



Şekil 6.7 800 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü

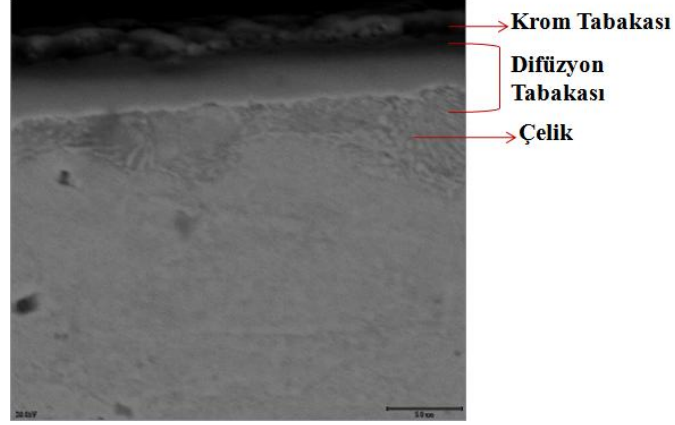


Şekil 6.8 700 °C’de nikel yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü

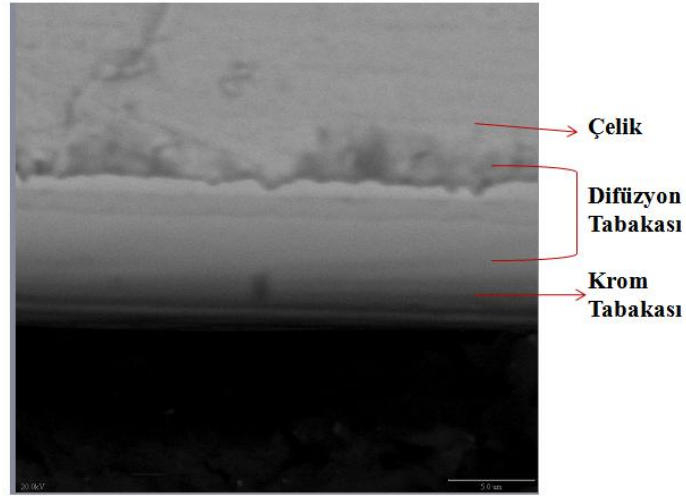
Şekil 6.7-8’ de yüzeydeki nikel tabakası ve difüzyon tabakası görülmektedir. AISI 1040 çeliğinin 800 °C’de yayındırılmış halinde difüzyon tabakası kalınlığı yaklaşık olarak 12  $\mu\text{m}$ , 700 °C’de yayındırılmış halinde ise yaklaşık olarak 10  $\mu\text{m}$  bulunmuştur.

EDS analizlerinden yararlanılarak krom yayındırılan numunelerde difüzyon tabakası kalınlıkları yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Difüzyon tabakası kalınlıkları; AISI 1010 çeliği için 700 °C’de krom yayındırılmasıyla elde edilen difüzyon tabakası yaklaşık olarak 4  $\mu\text{m}$ , 800 °C’de krom yayındırılmasıyla elde edilen difüzyon tabakası yaklaşık olarak 5  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. AISI 1040 çeliği için 700 °C’de krom yayındırılmasıyla elde edilen difüzyon tabakası yaklaşık olarak 4

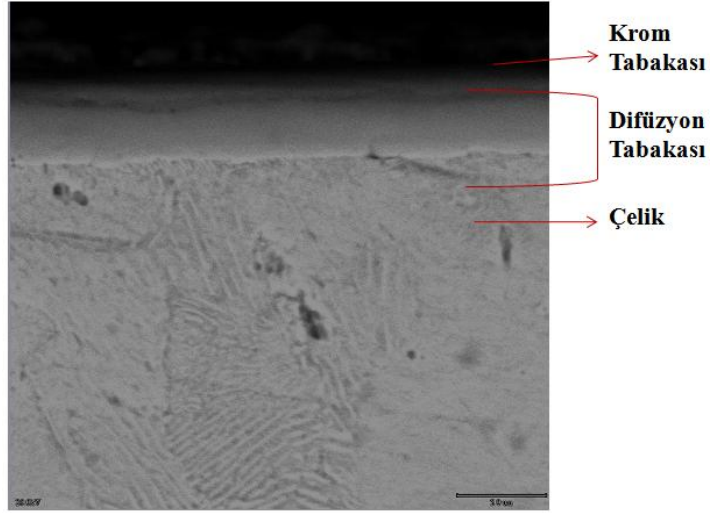
$\mu\text{m}$ , 800 °C’de krom yayındırılmasıyla elde edilen difüzyon tabakası yaklaşık olarak 3,5  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.9-12’de krom yayındırılmış çeliklerin SEM görüntülerini görülmektedir.



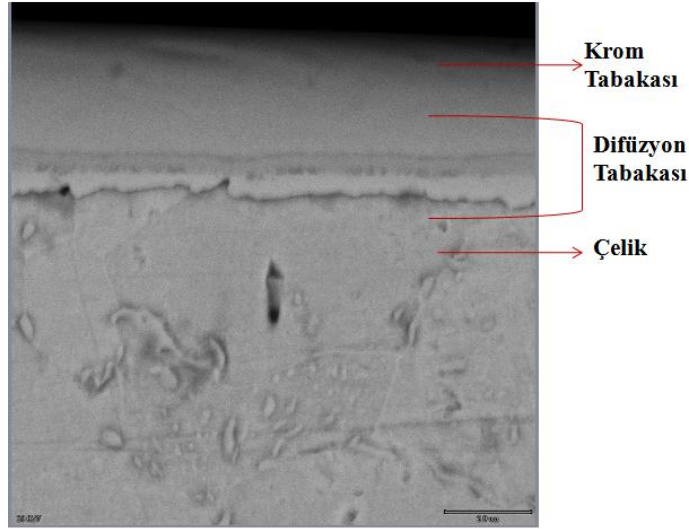
Şekil 6.9 800 °C’de krom yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü



Şekil 6.10 700 °C’de krom yayındırılmış AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü

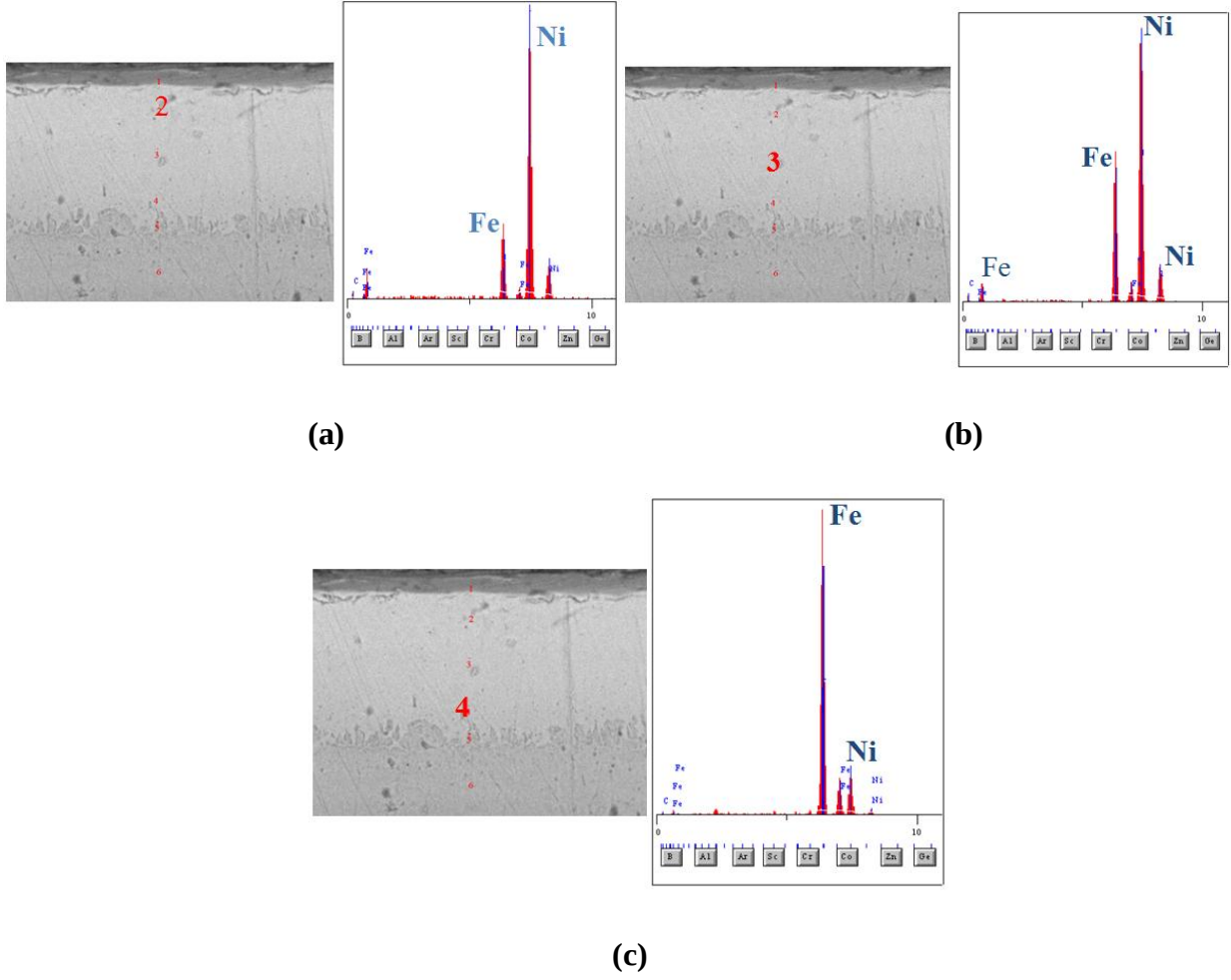


Şekil 6.11 800 °C’de krom yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü



Şekil 6.12 700 °C’de krom yayındırılmış AISI 1040 çeliğinin SEM görüntüsü

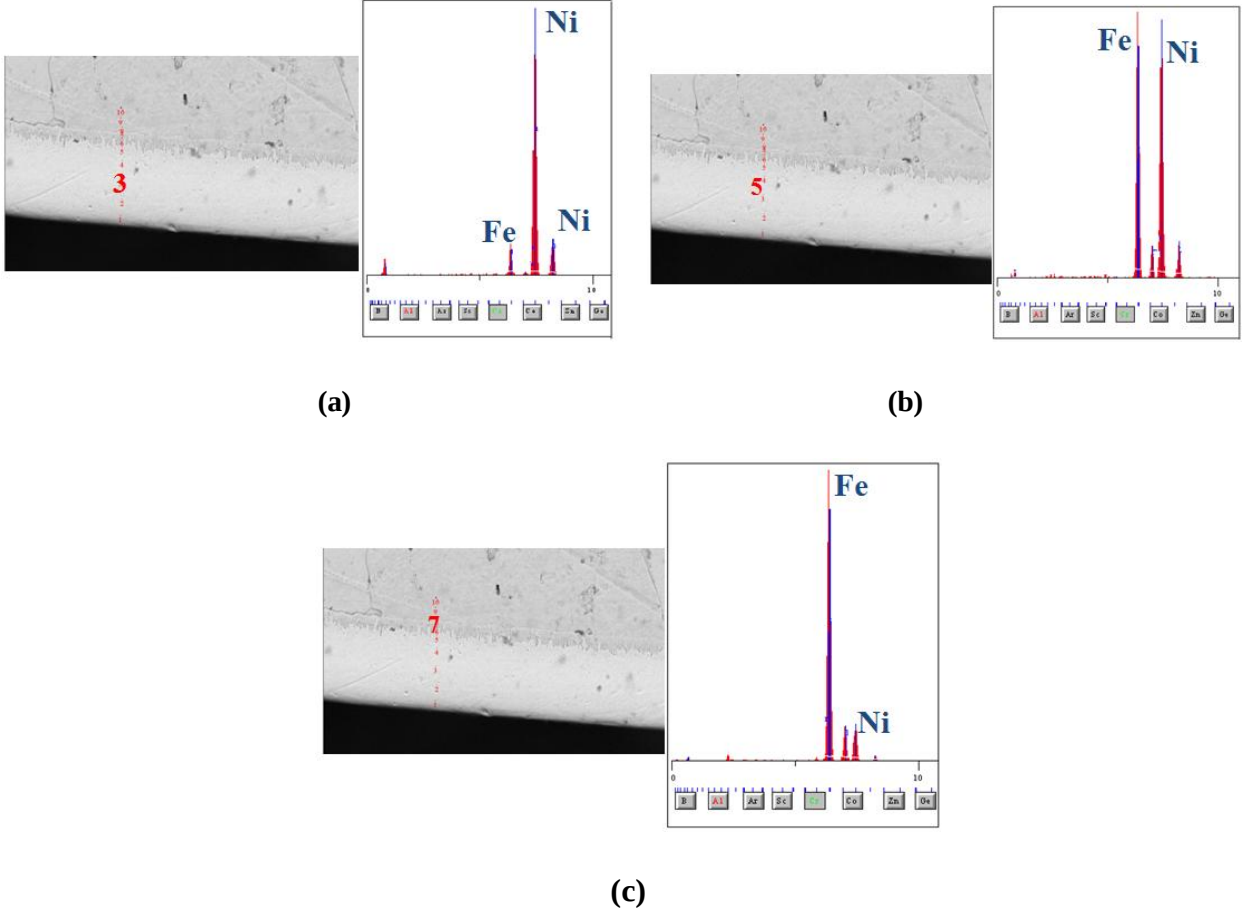
Altlık malzemesinden ve difüzyon bölgesininin çeşitli yerlerinden EDS analizleri alınmıştır. Altlık malzemesine doğru gidildikçe nikel kaplanan numunelerde nikel oranının azaldığı, krom kaplanan numunelerde krom oranının azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.13 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1010 Çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 2 no'lu b) 3 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.2 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1010 Çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 2 no'lu b) 3 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri

|    | 2 nolu nokta (%) | 3 nolu nokta (%) | 4 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 11.138           | 18.979           | 73.813           |
| Ni | 78.711           | 66.028           | 19.022           |

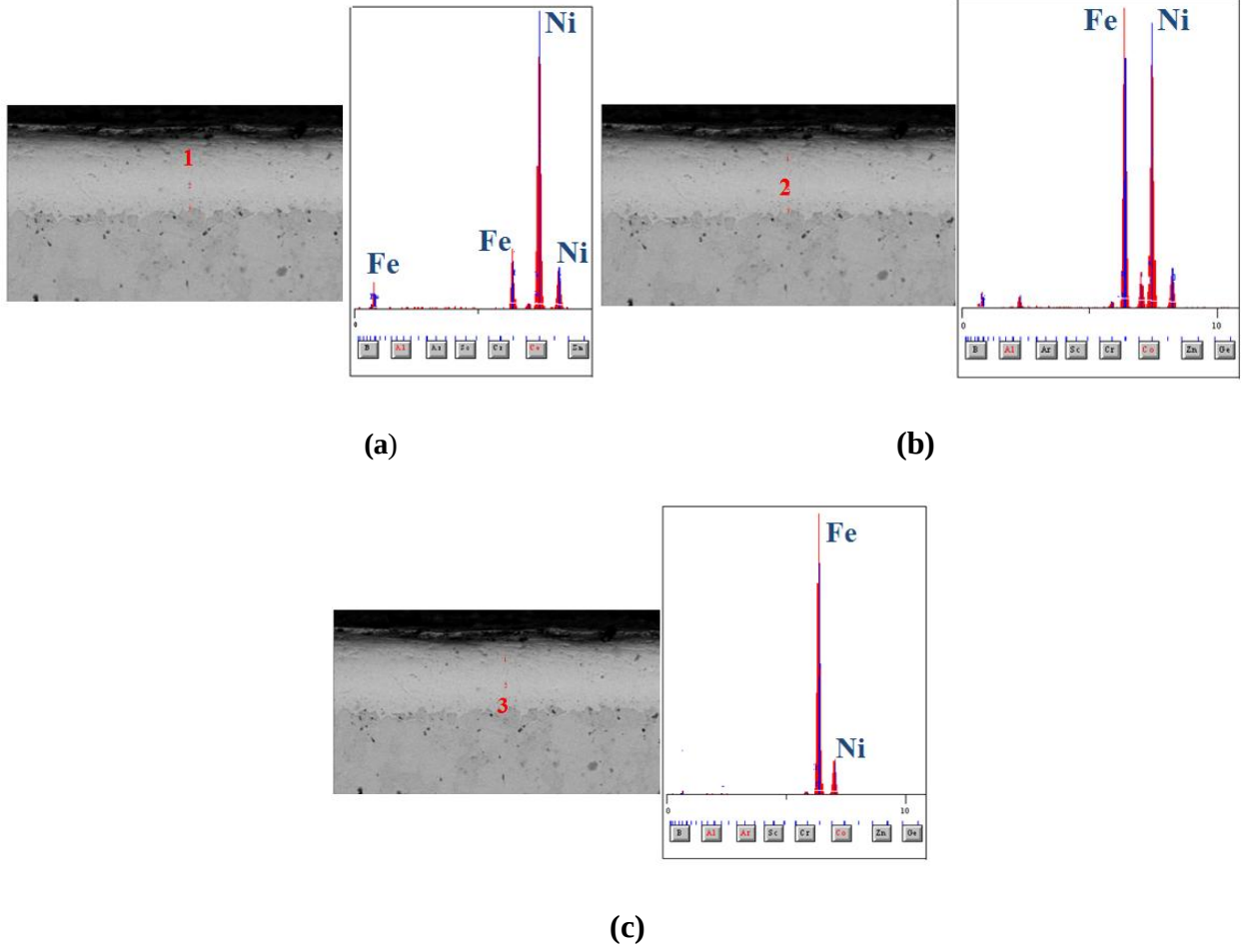


Şekil 6.14 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1010 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 3 no'lu b) 5 no' lu c) 7 no' lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.3 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1010 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 3 no'lu b) 5 no' lu c) 7 no' lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri

|    | 3 nolu nokta (%) | 5 nolu nokta (%) | 7 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 5.626            | 35.895           | 82.112           |
| Ni | 94.251           | 63.964           | 17.698           |



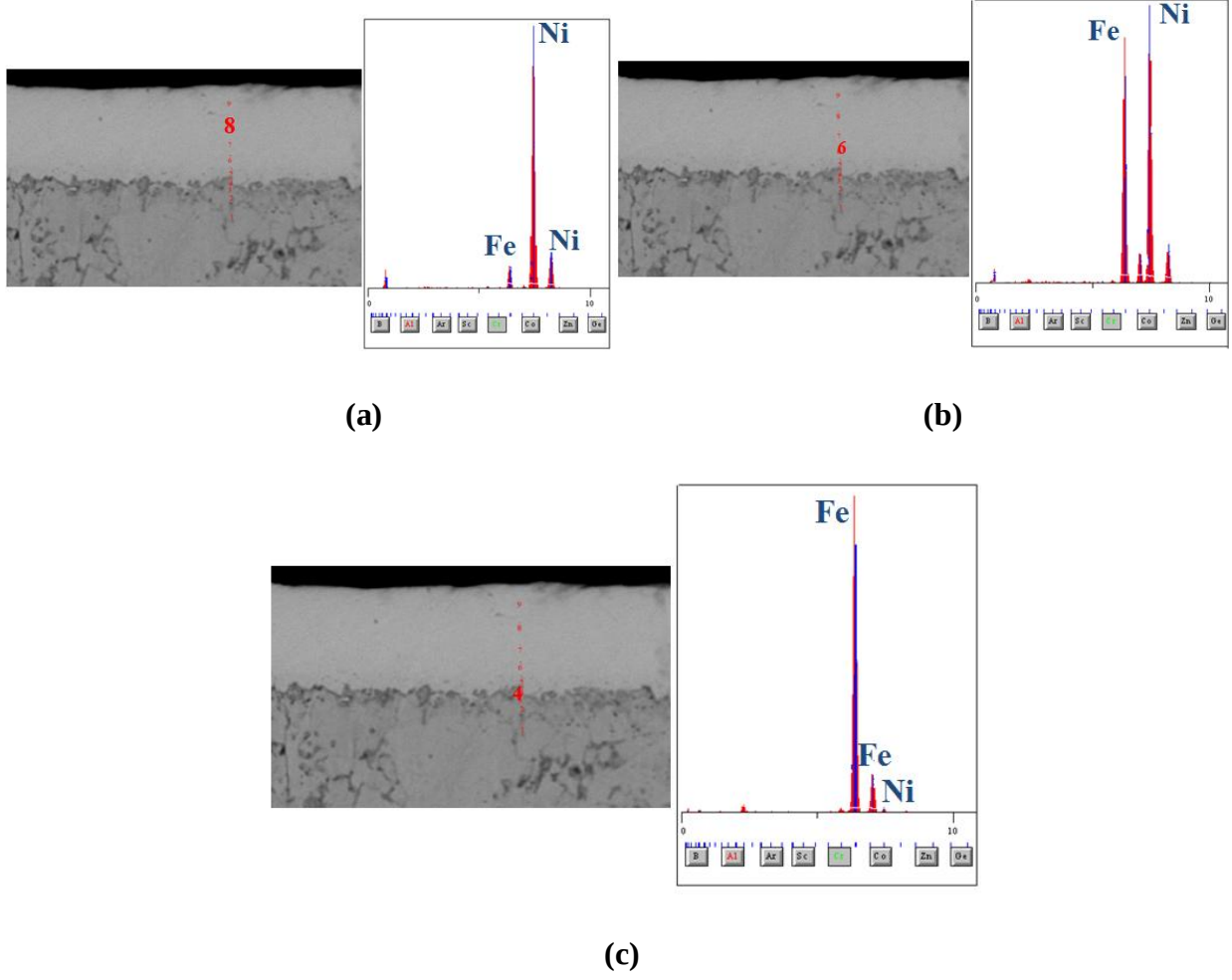


Şekil 6.15 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 3 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.4 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 3 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri

|    | 1 nolu nokta (%) | 2 nolu nokta (%) | 3 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 9.062            | 36.304           | 98.999           |
| Ni | 90.938           | 62.212           | 0.324            |

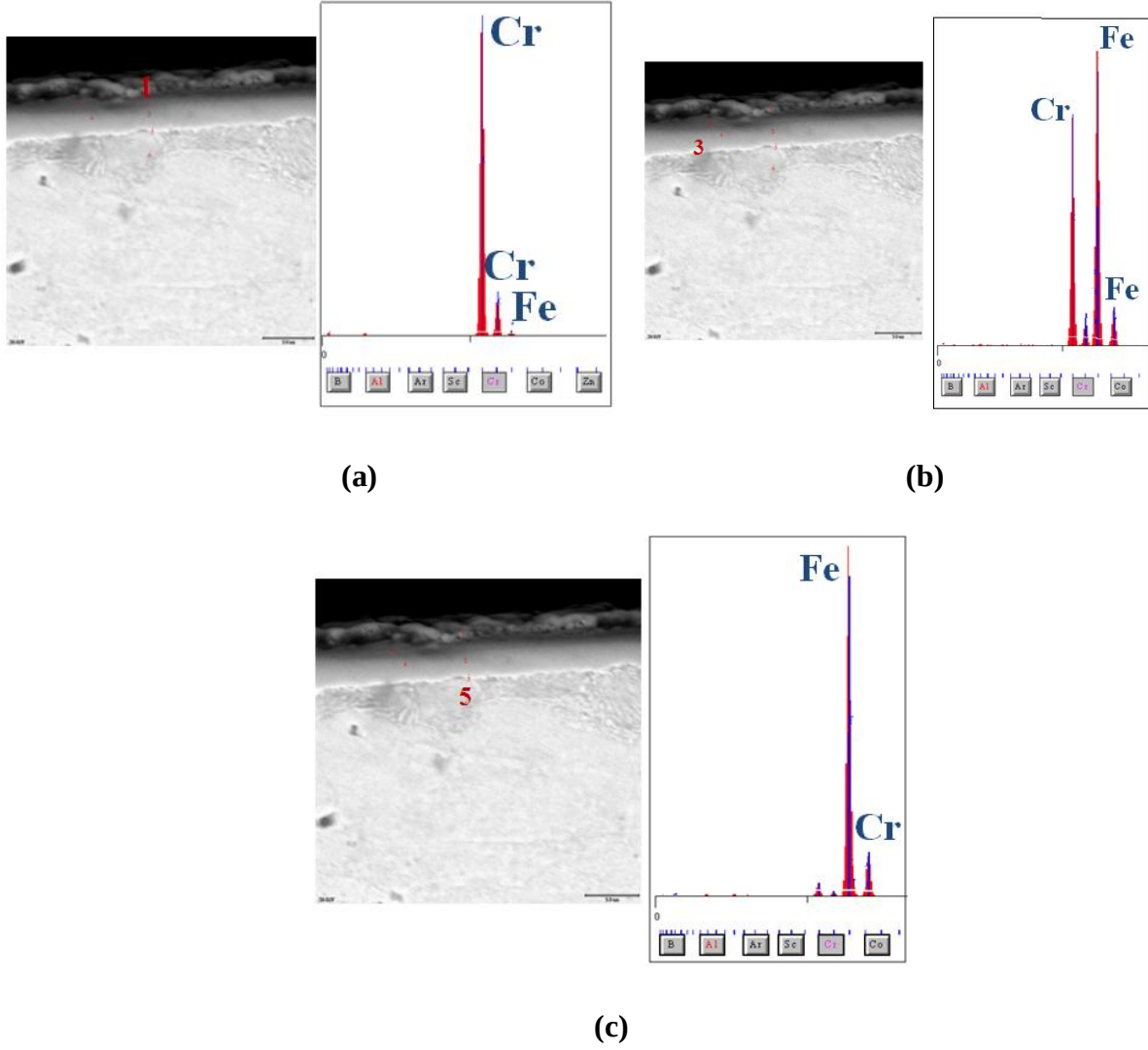




Şekil 6.16 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 8 no' lu b) 6 no 'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.5 Elektrolitik Nikel Kaplanmış AISI 1040 Çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 8 no' lu b) 6 no 'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış kimyasal analizleri

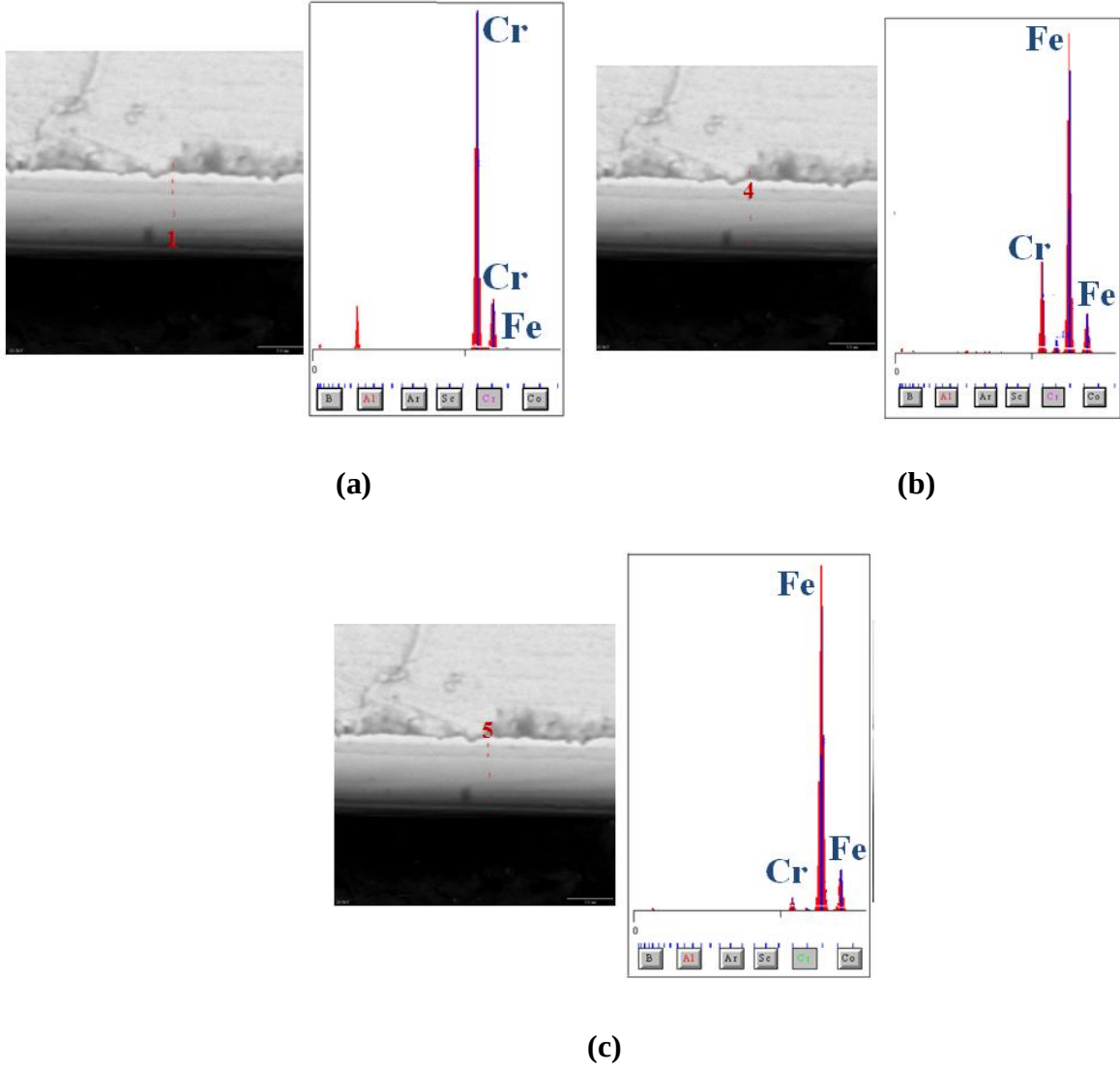
|    | 8 nolu nokta (%) | 6 nolu nokta (%) | 4 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 4.074            | 32.671           | 97.523           |
| Ni | 95.542           | 67.143           | 2.321            |



Şekil 6.17 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 3 no'lu c) 5 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.6 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 3 no'lu c) 5 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri

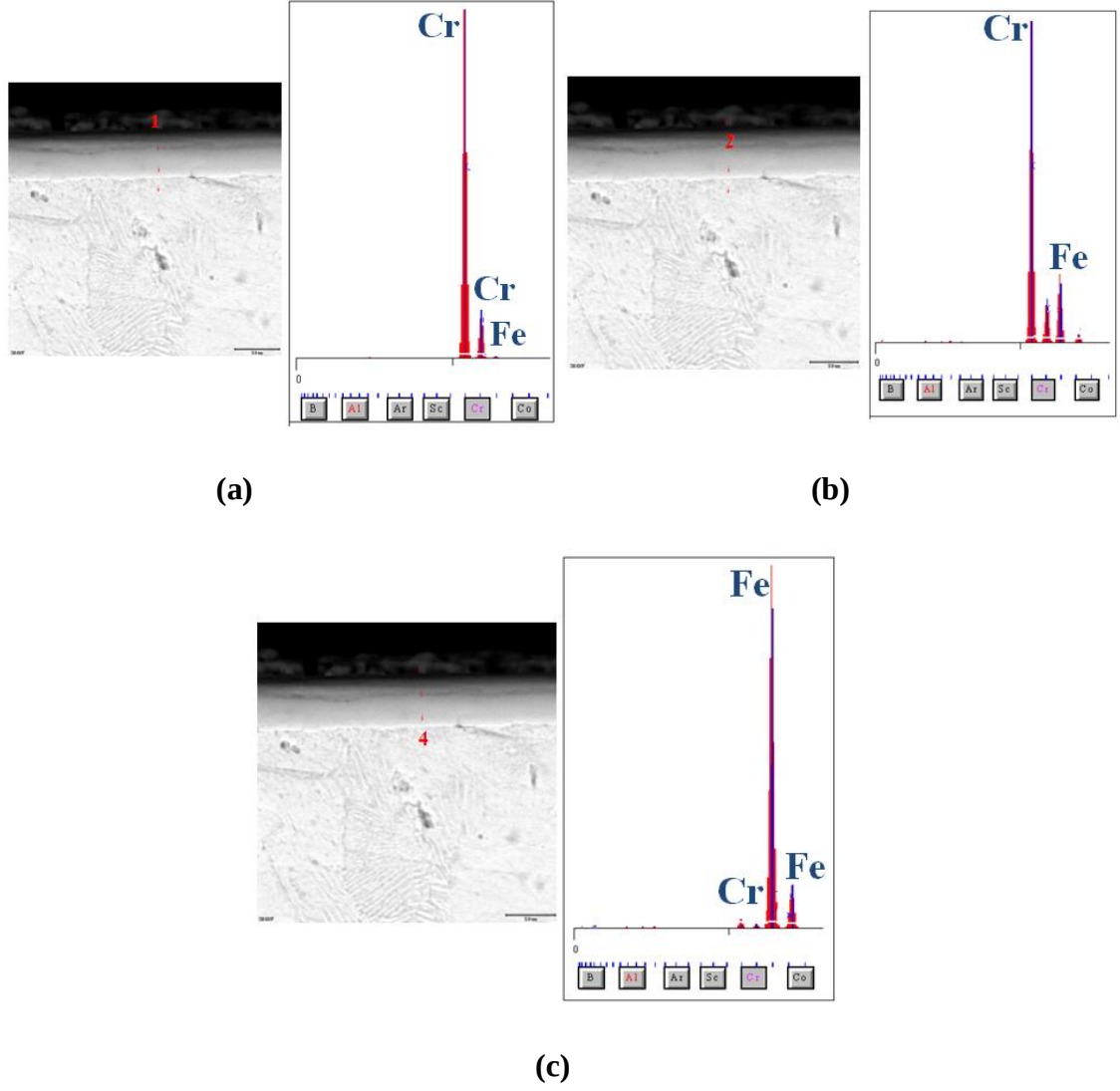
|    | 1 nolu nokta (%) | 3 nolu nokta (%) | 5 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 2.863            | 67.945           | 97.534           |
| Cr | 97.137           | 31.680           | 2.016            |



Şekil 6.18 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 4 no'lu c) 5 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.7 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 4 no'lu c) 5 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri

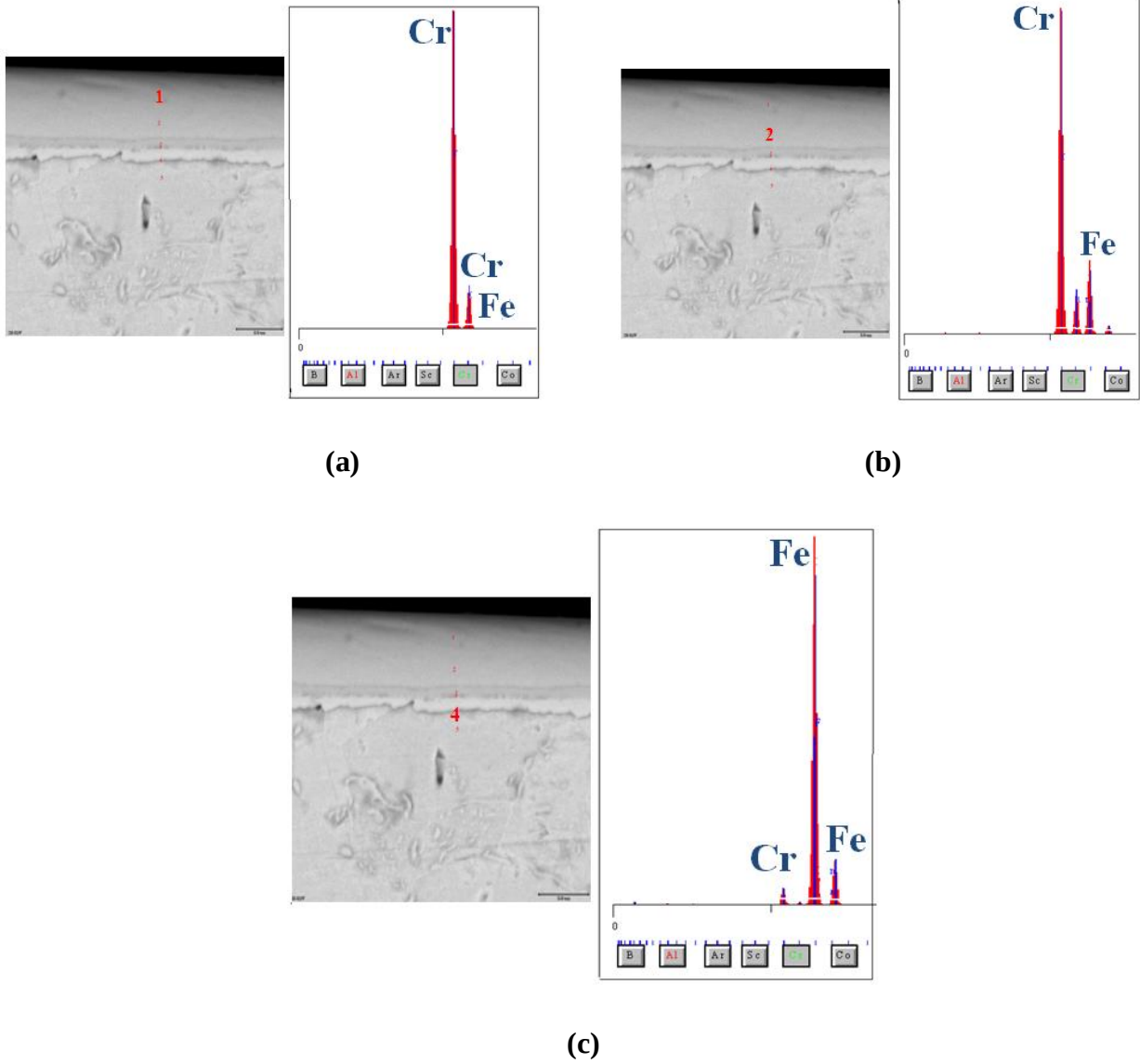
|    | 1 nolu nokta (%) | 4 nolu nokta (%) | 5 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 1.087            | 85.702           | 97.840           |
| Cr | 98.913           | 13.998           | 1.962            |



Şekil 6.19 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.8 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri

|    | 1 nolu nokta (%) | 2 nolu nokta (%) | 4 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 1.538            | 26.291           | 98.218           |
| Cr | 98.462           | 73.709           | 1.323            |



Şekil 6.20 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 700 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış EDS analizleri

Çizelge 6.9 Elektrolitik krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 800 °C de 4 saat ısıt işlem görmüş halinin a) 1 no'lu b) 2 no'lu c) 4 no'lu bölgelerinden alınmış elementel analizleri

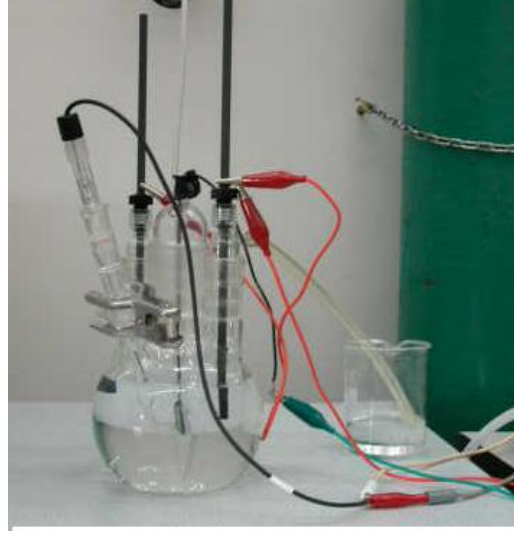
|    | 1 nolu nokta (%) | 2 nolu nokta (%) | 4 nolu nokta (%) |
|----|------------------|------------------|------------------|
| Fe | 0.662            | 26.898           | 97.781           |
| Cr | 99.338           | 73.102           | 1.911            |

### 6.5.2 Korozyon Deneyleri

Çelik yüzeylerine yayındırılan nikel ve kromun çeliklerin korozyon özelliklerini nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Korozyon testinden önce numuneler hassas kesme cihazında kesilmiş; numune yüzeylerinde yayınmadan kalan krom 20 ml  $\text{HNO}_3$ , 60 ml HF asitlerinden oluşan çözelti ile, nikel ise 80 ml  $\text{HNO}_3$ , 3 ml HF asitlerinde oluşan çözelti ile kaldırılmıştır. Yüzeylerinde kalan nikel ve krom kaldırılan numunelerin yüzeyleri asitlerin etkisini gidermek amacıyla elmas pasta ile hafifçe parlatılmıştır. Numuneler üst kısımlarından delinmiş, yüzeylerinde 1  $\text{cm}^2$  lik alan boş kalacak şekilde silikonlanmıştır. Korozyon deneyleri 1  $\text{cm}^2$  lik alanda gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneyleri Princeton Applied Research Parstat 2253 marka korozyon cihazı ile yapılmıştır. Korozyon düzeneği ve cihazı şekil 6.21 ve 6.22’de görülmektedir.

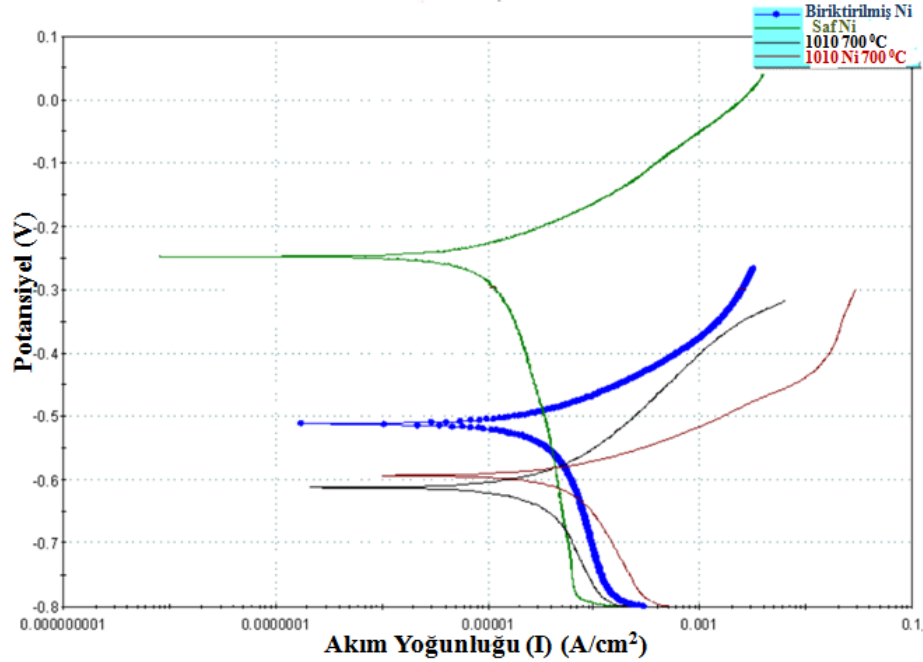


Şekil 6.21 Princeton Applied Research Parstat 2253 marka korozyon cihazı



Şekil 6.22 Korozyon deney düzeneği

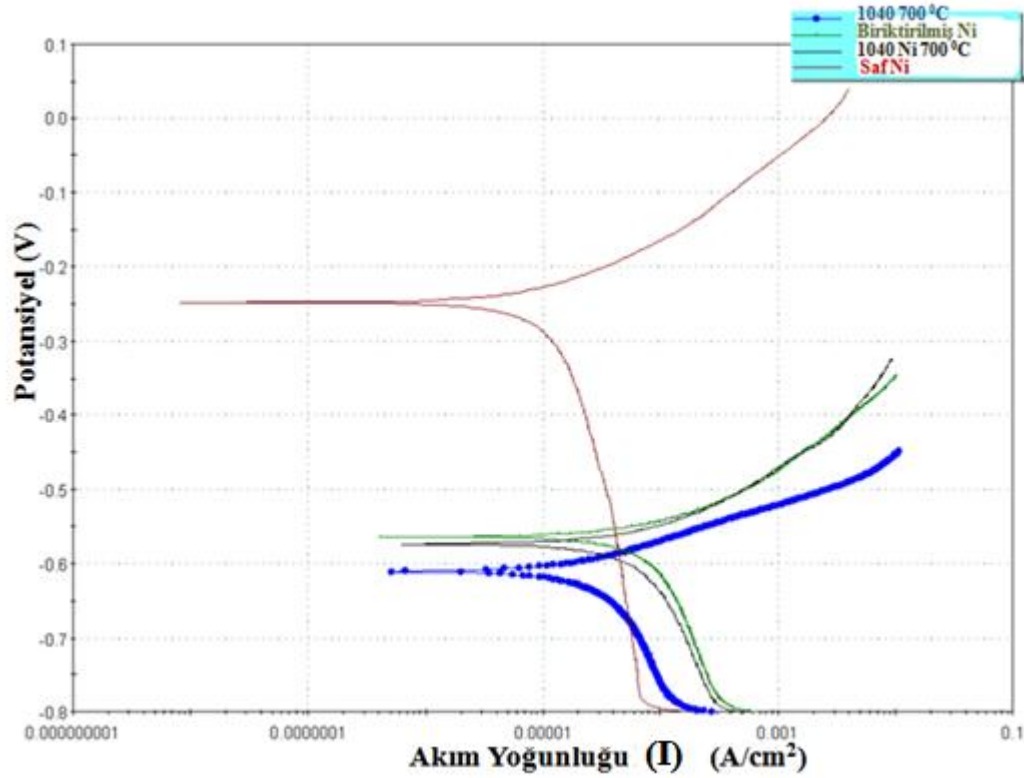
Korozyon deneyleri, % 3,5'lik NaCl çözeltisinde yapılmış ve elde edilen sonuçlar polarizasyon eğrilerinde verilmiştir. Şekil 6.23-28' de % 3,5'lik NaCl çözeltisinde çeliklerin kaplanmış, yayınmış, ve sadece ısıtılmış hallerinin polarizasyon eğrileri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 6.23 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Şekil 6.23'den görüldüğü gibi AISI 1010 çeliğine 700 °C de nikel yayındırılmasıyla, 700 °C deki ısıtıl işlem görmüş haline göre korozyon potansiyelinde bir artışa sebep olmuştur. Isıl işlemlili halinin potansiyel değeri -612 mV iken, nikel yayındırılmasıyla bu değeri -593 mV'a yükselmiştir.

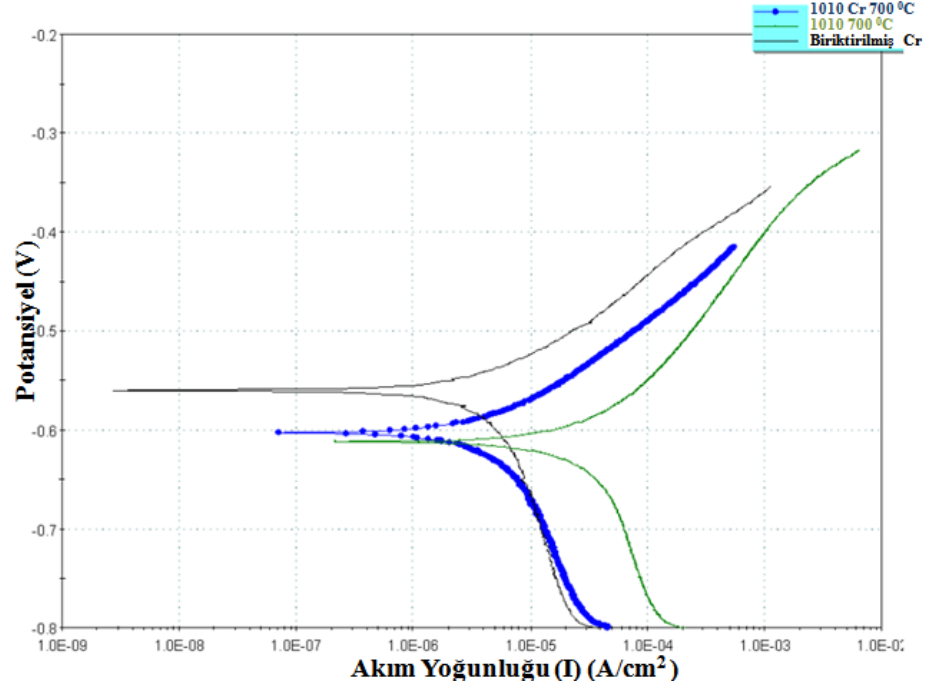
Şekil 6.24'de ise AISI 1040 çeliğine 700 °C de nikel yayındırılması ile elde edilen polarizasyon eğrileri görülmektedir. Malzemenin 700 °C de tavllanmış halinin potansiyel değeri -611 mV iken, nikel yayındırılmasıyla potansiyel değeri -574 mV'a yükselmiştir.



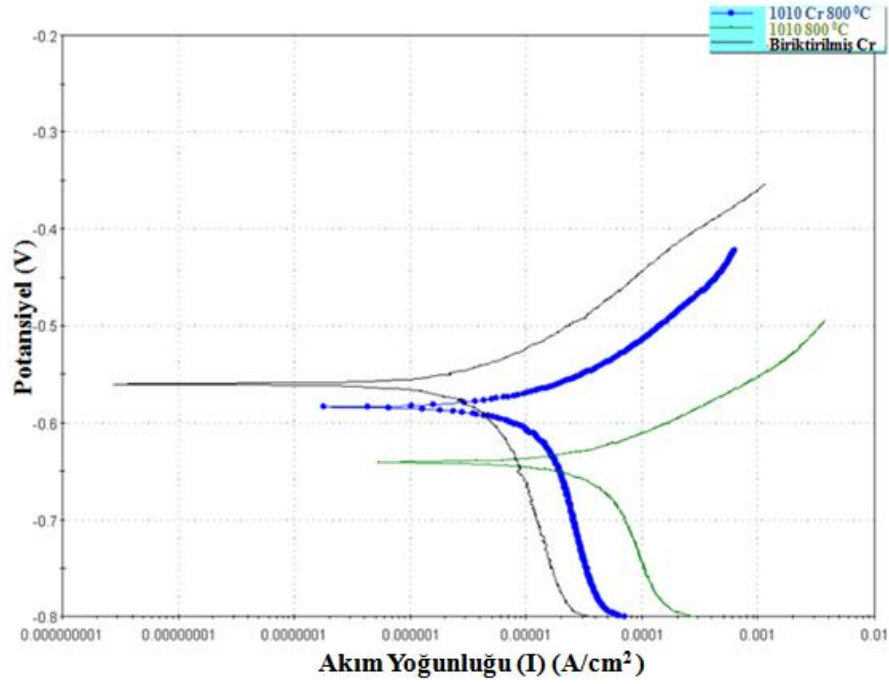
Şekil 6.24 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Şekil 6.25-28'de AISI 1010 ve AISI 1040 çeliklerine krom yayındırılmasıyla elde edilen polarizasyon eğrileri, sadece krom kaplamaya ait polarizasyon eğrileri ve yayınma sıcaklığında ısıtıl işlem görmüş hallerinin polarizasyon eğrileri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

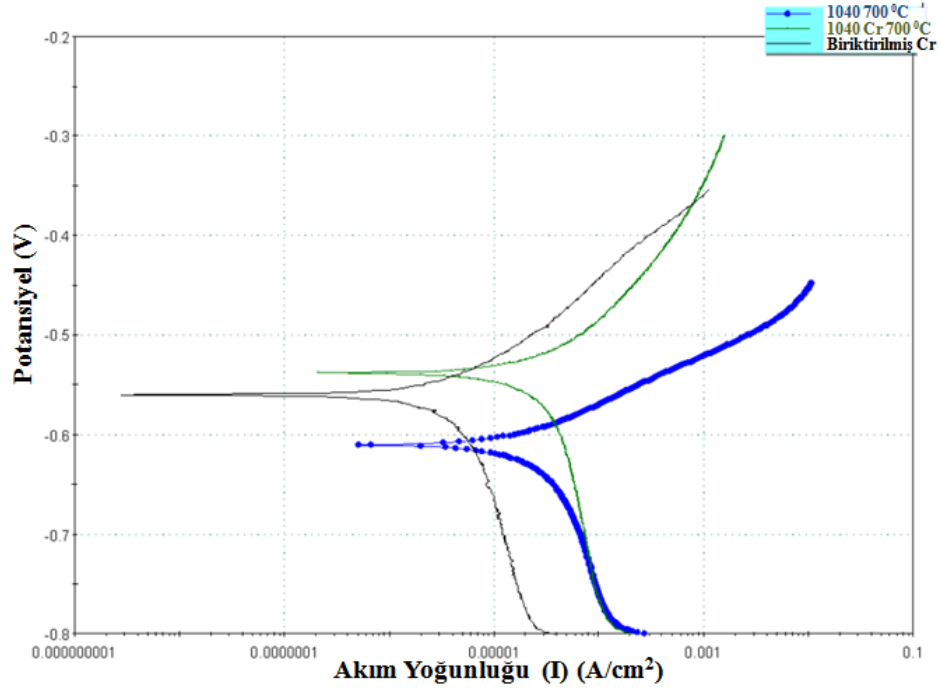




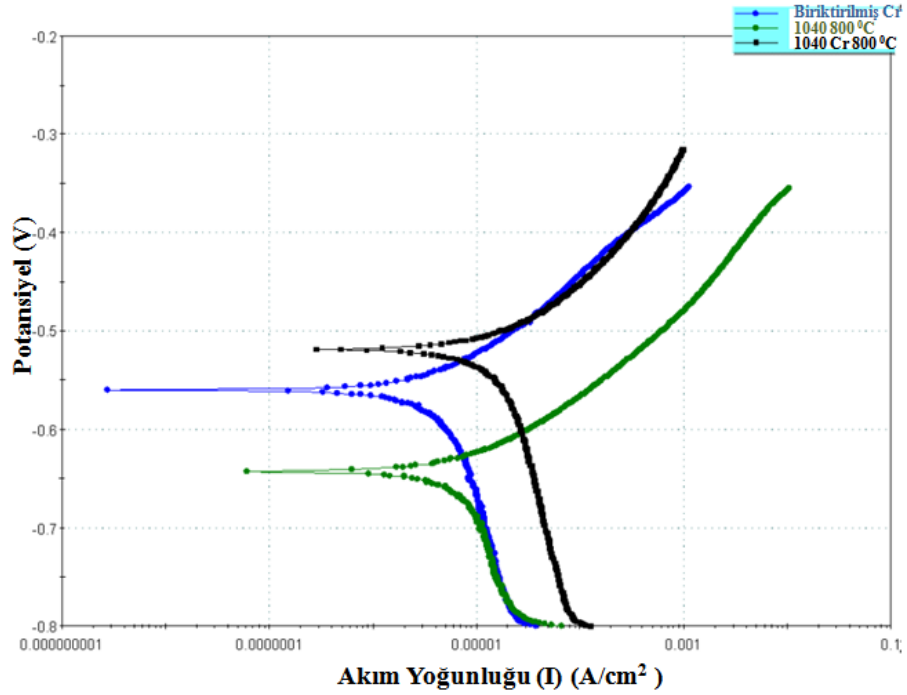
Şekil 6.25 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1010 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 6.26 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1010 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 6.27 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



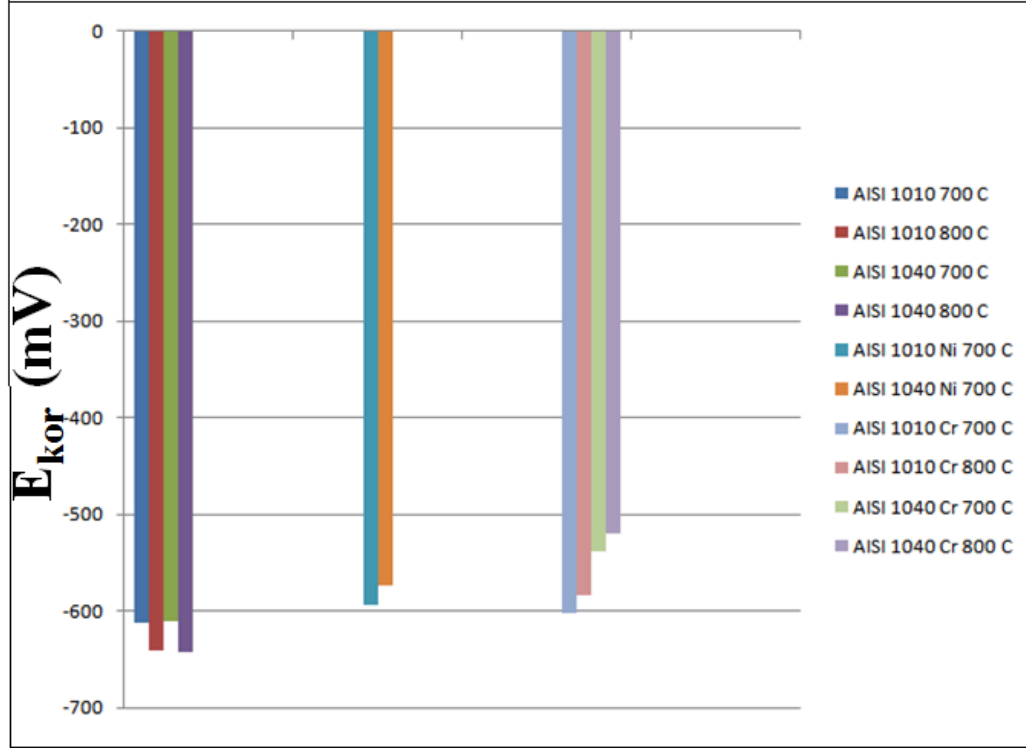
Şekil 6.28 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullardaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Korozyon deneylerinde elde edilen bütün  $E_{kor}$  değerleri çizelge 6.10'da verilmiştir. AISI 1010 çeliğine 700 °C'de krom yayındırılmasıyla, 700 °C'de tavllanmış AISI 1010 çeliğinin korozyon potansiyel değeri -612 mV'dan -603 mV'a; AISI 1010 çeliğine 800 °C'de krom yayındırılmasıyla, 800 °C'de tavllanmış AISI 1010 çeliğinin korozyon potansiyel değeri -641 mV'dan -584 mV'a yükseldiği gözlenmiştir.

Aynı şekilde, AISI 1040 çeliğine 700 °C'de krom yayındırılmasıyla, 700 °C'de tavllanmış AISI 1040 çeliğinin korozyon potansiyel değeri -611 mV'dan -538 mV'a; AISI 1040 çeliğine 800 °C'de krom yayındırılmasıyla, 800 °C'de tavllanmış AISI 1040 çeliğinin korozyon potansiyel değeri -643 mV'dan -519 mV'a yükseldiği gözlenmiştir.

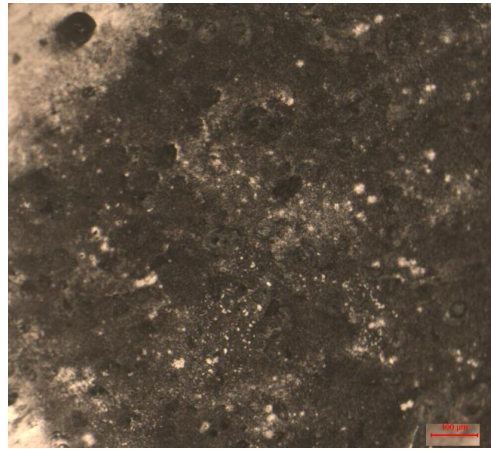
Çizelge 6.10 % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde malzemelerin  $E_{kor}$  değerleri

| Malzeme                                     | $E_{kor}$ (mV) |
|---------------------------------------------|----------------|
| 700 °C'de tavllanmış AISI 1010 çeliği       | -612           |
| 800 °C'de tavllanmış AISI 1010 çeliği       | -641           |
| 700 °C'de tavllanmış AISI 1040 çeliği       | -611           |
| 800 °C'de tavllanmış AISI 1040 çeliği       | -643           |
| 700 °C'de Ni yayındırılmış AISI 1010 çeliği | -593           |
| 700 °C'de Ni yayındırılmış AISI 1040 çeliği | -574           |
| 700 °C'de Cr yayındırılmış AISI 1010 çeliği | -603           |
| 800 °C'de Cr yayındırılmış AISI 1010 çeliği | -584           |
| 700 °C'de Cr yayındırılmış AISI 1040 çeliği | -538           |
| 800 °C'de Cr yayındırılmış AISI 1040 çeliği | -519           |



Şekil 6.29 Bütün numunelerin korozyon potansiyellerinin karşılaştırılması

Şekil 6.30'de korozyon deneyinden sonra numune yüzeyinin ışık mikroskopunda alınan mikroyapı görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.30 Korozyon deneyinden sonra çeliğin yüzey görüntüsü

### 6.5.3 Mikrosertlik Ölçümleri

Numunelerin mikrosertlik ölçümleri şekil 6.31’de görülen Bulut Makine HVS-1000 marka mikrosertlik ölçüm cihazıyla 50 g yük altında yapılmıştır. Her bir numune için numune yüzeylerinden üçer sertlik değeri alınıp, bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Numunelerde elde edilen sertlik değerli çizelge 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.31 Bulut Makine HVS-1000 marka mikrosertlik ölçüm cihazı

Çizelge 6.11 Malzemelerin mikrosertlik değerleri

| Malzeme                                     | Sertlik (HV) |
|---------------------------------------------|--------------|
| 700 °C’de tavllanmış AISI 1010 çeliği       | 200,58       |
| 800 °C’de tavllanmış AISI 1010 çeliği       | 220,03       |
| 700 °C’de tavllanmış AISI 1040 çeliği       | 217,53       |
| 800 °C’de tavllanmış AISI 1040 çeliği       | 240,85       |
| 700 °C’de Ni yayındırılmış AISI 1010 çeliği | 204,53       |
| 700 °C’de Ni yayındırılmış AISI 1040 çeliği | 191,67       |
| 700 °C’de Cr yayındırılmış AISI 1010 çeliği | 276,35       |
| 800 °C’de Cr yayındırılmış AISI 1010 çeliği | 328,94       |
| 700 °C’de Cr yayındırılmış AISI 1040 çeliği | 356,04       |
| 800 °C’de Cr yayındırılmış AISI 1040 çeliği | 526,76       |

Çeliklerin hiç işlem görmemiş hallerinin değerleri AISI 1010 için 172 HV, AISI 1040 çeliği için ise 198,97 HV olarak ölçülmüştür. Çeliklere krom yayındırılması ile sertliklerinde artış gözlenmiştir. En yüksek sertlik değeri 800 °C’de krom yayındırılmış AISI 1040 çeliğinde elde edilmiştir. Sertlik değerinin 210 HV’den 526,76 HV’ye yükseldiği gözlenmiştir.

## 7. SONUÇLAR

- AISI 1010 ve AISI 1040 çeliklerine elektrolitik olarak kaplanan nikelin ve kromun çelik yüzeylerine difüzyonu başarıyla sağlanmıştır.
- Difüzyon tabakası kalınlıkları karşılaştırıldığında çeliklerde karbon içeriğinin difüzyona etkisi görülmektedir. Karbon oranı daha düşük olan AISI 1010 çeliğinde difüzyon, AISI 1040 çeliğine göre daha hızlıdır.
- Sıcaklık difüzyon için önemli bir parametredir. Difüzyon tabakası kalınlıkları karşılaştırıldığında, nikel ve krom çeliklere; 700 °C’ de yapılan yayındırmaya göre, 800 °C’de daha iyi yayınmıştır. Artan sıcaklıkla difüzyon artmıştır.
- AISI 1010 ve AISI 1040 çeliklerine nikel ve krom yayındırılmasıyla çeliklerin korozyon dirençleri artmıştır. En yüksek korozyon potansiyel değerine 800 °C’de krom yayındırılmış AISI 1040 çeliğinde ulaşılmıştır.
- Krom yayındırılan numunelerde sıcaklık ve karbon içeriği artışı sertliği arttırmıştır. En yüksek sertlik değeri 800 °C’de krom yayındırılmış AISI 1040 çeliğinde elde edilmiştir. Bu sertlik değeri diğerlerine nazaran daha da yüksektir. Bu yüksek sertlik değerinin, karbon içeriğinin yüksek olmasından dolayı krom karbür oluşmuş olma ihtimalinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılacak olan XRD analizleri ile bunun değerlendirilmesi yapılacaktır.

## KAYNAKLAR

Akbulut H. , (2006) , Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi Ders Notları

ASM International Handbook Committee, (1994), ASM Metals Handbook Volume 5: Surface Engineering, ASM International, U.S.A

ASM International Handbook Committee, (1987), ASM Metals Handbook Volume 13: Corrosion, U.S.A

Bardal E. , (2003), Corrosion and Protection, Springer-Verlag London Limited, U.S.A

Buytoz, S. ,(1999), “Alüminyum matrisli  $Al_2O_3$  takviyeli kompozit malzemelerin katı hal birleştirme teknikleri ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ,

Callister D.W. , (2001), Fundamentals of Materials Science and Engineering, John Wiley&Sons Inc., NewYork

Caruta B.M. , (2005), Thin Films and Coatings: New Research, Novi Science Publisher Inc. , NewYork

Copola C.J. , Avram I. , M.C. Terzzoli M.C, Duhalde S. , Morales C. ,Pe´rez T. , Audebert F. , Delaporte PH. ve Sentis M., (2002), “Influence of laser parameters on the nitriding of low carbon steel”, Applied Surface Science, 197–198 : 896–903

Çelik A. , Alsaran A. ve Karakan M. , (2002), “Plazma ile Termokimyasal İşlemler”, Mühendis ve Makine, 43(510):17-21

Davis J.R., (2001), Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, ASM International, Ohio

Davis J.R., (2003), Corrosion: Understanding The Basics, ASM International Materials Park, Ohio

Deniz G. , (2004), “Termoreaktif Difüzyon Tekniği ile AISI 1010 ve AISI M2 çeliklerinin titanyum nitrür kaplanması” , Sakarya Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Sakarya

Fidan L. ,(2006), Saf alüminyum ve saf bakırın difüzyon kaynağında arafazların oluşumu ve etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir

Genel K., (2005), “Boriding kinetics of H13 steel”, Vacuum, 80:451–457

Güngör Y. , (2001), Malzeme Bilgisi, Beta Basım A.Ş, İstanbul

Jaoul C. , Belmonte T., Czerwicz T., ve David N., (2005) , “Nitrocarburizing treatments using flowing afterglow processes”, Applied Surface Science, 252:8360–836



- Kohlscheen J. ve Stock H.R. , (2007), “ Gas phase aluminizing of nickel alloys with hydrogen chloride”, Surface & Coatings Technology, 202 :613–616
- Kurt, A., (1996), “Toz metalden üretilen bronz yatağın düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi” , Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- Lee S.Y, Kim G.S ve Kim B.S, (2003), “Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment”, Surface and Coatings Technology, 177 –178:178–184
- Li C. , He Q. , Tang W. ve Lu F. , (2004), “Carburising of steel AISI 1010 by using a cathode arc plasma process”, Surface & Coatings Technology, 187 : 1– 5
- Markos Z. , (2010), “The influence of heat treatment temperature on diffusion zone at siliconized brass”, Bulletin of the Transilvania University of Brasov Vol. 3 (52)
- Mirjani M. , Shafyei A. ve Ashrafizadeh F., (2008), “Plasma and gaseous nitrocarburizing of C60W steel for tribological applications”, Vacuum, 83:1043–1048
- Oğuz B., (1990), Sert Lehimleme, Oerlikon Yayınları, İstanbul
- Onaran K. , (2006), Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul
- Osma A., (1999), “İnce Sert Seramik Kaplamaların Kazımalı Aşınma Davranışları İle Endüstriyel Zımbalama İşlemine Uygulanmaları” , Doktora Tezi, , İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Ozdemir O., Sen S. ve Sen U., (2007), “Formation of chromium nitride layers on AISI 1010 steel by nitro-chromizing treatment”, Vacuum, 81: 567–570
- Pazarlıoğlu S.S. , (2006), “Çeliklerin Niobyum Borür Kaplanması ve Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Potgieter J.H. , Olubambi P.A. , Cornish L. , Machio C.N. ve El-Sayed M. Sherif, (2008), “Influence of nickel additions on the corrosion behaviour of low nitrogen 22% Cr series duplex stainless steels”, Corrosion Science, 50:2572–2579
- Schaffer J. P. , Saxena A. , Antolovich S. D. , Sanders. T. H. , ve Warner S. B., (1999), The Science and Design of Engineering Materials, McGraw-Hill
- Shen D.J. , Wang Y.L, Nash P. ve Xing G.Z., (2006), “A novel method of surface modification for steel by plasma electrolysis carbonitriding”, Materials Science and Engineering, A 458: 240–243
- Smith W.F, (1990), Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill International Editions Engineering Series, U.S.A

Spence T.W ve Makhoul M.M., (2004),” Characterization of the operative mechanism in potassium fluoborate activated pack boriding of steels”, Journal of Materials Processing Technology, 168:127–136

Tarakci M. , Korkmaz K. ,Gencer Y ve Usta M., (2005), “Plasma electrolytic surface carburizing and hardening of pure iron”, Surface & Coatings Technology, 199 : 205– 212

Uluköy A. ve Can A.Ç., (2006), “Çeliklerin Borlanması”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12-2:189-198

Vander Voort G.F. , (2004), ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures, ASM International, U.S.A

Vojtech D. , Novak P. , Machac P. , Mort’anikova M. ve Jurek K. , (2008), “Surface protection of titanium by Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> silicide layer prepared by combination of vapour phase siliconizing and heat treatment”, Journal of Alloys and Compounds, 464:179–184

Wang K.L. , Chen F.S ve Leu G.S., (2003), “The aluminizing and Al-Si codeposition on AISI HP alloy and the evaluation of their carburizing resistance”, Materials Science and Engineering, A357:27-38

Wang L. , Kim D.S. , Nam K.S., Kim M. ve Kwon S.C., (2004), “Microstructure of electroplated hard chromium coatings after plasma nitrocarburizing”, Surface & Coating Technology 190:151–154

Wang J., Zhang G., Sun J., Bao Y., Zhuang L. ve Wen H., (2005), “Low temperature nitriding of medium carbon steel”, Vacuum, 80 : 855–859

Wang Z.B. , Lu J. ve Lu K., (2005),”Chromizing behaviors of a low carbon steel processed by means of surface mechanical attrition treatment”, Acta Materialia, 53:2081–2089

Yılmaz E. , (2008), “Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Çeliklerin Demir Alüminid Kaplanması”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

Zhou Y., Chen H.Y., Zhang H.J. ve Wang Y.D., (2008), “Oxidation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dispersion chromizing coating by pack-cementation at 800 °C”, Trans.Nonferrous Met. Soc. China, 18:598-602

### **İnternet Kaynakları**

[1] <http://eyupyaylaci.com/fe-c-denge-diyagrami/>

[2] <http://news.alibaba.com/article/detail/metalworking/100187932-1-metals-knowledge%253A-effect-phosphorus-properties.html>

[3] <http://www.insaatim.com/?pid=yazidetay&yazi=203>

[4] <http://practicalmaintenance.net/?p=1315>

- [5] <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/alloyingeffect.html>
- [6] <http://www.calphad.com/iron-chromium.html>
- [7] <http://www.owl.net.rice.edu/~msci301/Spring2004.htm>
- [8] [http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon\\_steels/show\\_carbon.cfm?ID=AISI\\_1010&show\\_prop=all&Page\\_Title=AISI%201010](http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1010&show_prop=all&Page_Title=AISI%201010)
- [9] <http://www.stainless-steel-tube.org/Carbon-Steel-1010.htm>
- [10] [http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon\\_steels/show\\_carbon.cfm?ID=AISI\\_1040&prop=all&Page\\_Title=AISI%201040](http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1040&prop=all&Page_Title=AISI%201040)
- [11] <http://www.stainless-steel-tube.org/1040-steel.htm>
- [12] [http://www.tezproje.8m.com/fatih\\_bayraktaroglu1/2\\_3\\_termokimyasal\\_islemler.html](http://www.tezproje.8m.com/fatih_bayraktaroglu1/2_3_termokimyasal_islemler.html)

## ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 11.10.1985

Doğum Yeri : İstanbul

Lisans : 2004-2008

İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Yüksek Lisans: 2009-2010

Clausthal Teknik Üniversitesi(Almanya)

Yüksek Lisans : 2008-2011

Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji  
Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Anabilim Dalı-Malzeme Programı