

## ÖNSÖZ

Mita Kalıp ve Döküm Sanayii A.Ş. basınçlı döküm ve kalıp yapımı sektöründe Türkiye’de önde gelen firmalardan biridir. Teknolojik gelişmeleri başarının bir parçası olarak özümseyen Mita Kalıp ve Döküm Sanayii A.Ş., bu bağlamda İ.T.Ü. Metalurji Mühendisliği Bölümü ile ortak bir TİDEB projesi yürüterek bunu kanıtlamıştır. Bu projenin yapılmasına karar veren, gerekli imkanları sağlayan ve çalışmaların yürütülmesini destekleyen sayın Mita yöneticilerine, projede görev aldığım sürece ve sonrasında tez aşamalarında yardımlarını esirgemeyen Mita personeline; her konuda deneyim ve bilgilerini benimle paylaşan çok sevgili müdürlerim Bülent YARDIMCI, Fahri KAHRAMAN, Muammer MUTLU ve Mehmet Ali MUTLU’ya içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel çalışmaları destekleyen TİDEB’e de bu kapsamda teşekkür ederim.

Değerli bir bilim adamı olmasının yanında günümüzü yakalayan ve bunu hayata adapte eden, tanımaktan ve birlikte çalışmaktan şeref duyduğum sevgili hocam Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK’a, tecrübelerini, fikirlerini ve desteğini benimle paylaştığı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Üniversite hayatım boyunca her konuda değerli fikirlerine danıştığım, tüm çalışmalarını herkesin örnek aldığı, her konuda destekleyici tavrını ve ilgisini benden esirgemeyen, sevgili hocam Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN’e saygılarımı sunarım.

Tezimin yapımı aşamasında, kaplama ve karakterizasyon çalışmalarında vaktini ve deneyimlerini benden esirgemeyen Dr. O. Levent ERYILMAZ’a, numunelerimi hazırlarken ve fikirlerine her danıştığım da yardımlarıyla H. Hüseyin SEZER’e, sevgili Met. Müh. Aybars GÜVEN, Nuri SOLAK, Ebru BOZYAZI ve Burcu KOLOĞLU’na teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her devresinde olduğu gibi, tez çalışmalarım da benimle olan, tezime benim kadar emek veren, teşekkürlerimin yetersiz kaldığını bildiğim sevgili dostum Met. Yük. Müh. Bora ALPARSLAN’a buradan bir kez daha teşekkür ediyorum.

Desteğini, sevgisini ve ilgisini bu güne kadar benden ayırmayan sevgili annem ve babama tüm yaptıkları için minnettarım.

Mayıs 2002

Şeyda ÜRGEN

## İÇİNDEKİLER

|                                                    | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|----------------------------------------------------|------------------------|
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                               | <b>v</b>               |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                               | <b>vi</b>              |
| <b>ÖZET</b>                                        | <b>viii</b>            |
| <b>SUMMARY</b>                                     | <b>ix</b>              |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                    | <b>1</b>               |
| <b>2. LİTERATÜR ÖZETİ</b>                          | <b>3</b>               |
| 2.1. Basınçlı Döküm                                | 3                      |
| 2.2. Kalıp Ömrüne Etki Eden Faktörler              | 4                      |
| 2.2.1. Uygun Çelik Seçimi                          | 6                      |
| 2.2.1.1. Yapısal Homojenlik                        | 6                      |
| 2.2.1.2. Yüksek Sertlik                            | 6                      |
| 2.2.1.3. Yüksek Tokluk                             | 7                      |
| 2.2.1.4. Yüksek Süneklik                           | 7                      |
| 2.2.1.5. Yüksek Aşınma Direnci                     | 7                      |
| 2.2.1.6. Yüksek Isıl İletkenlik                    | 8                      |
| 2.2.1.7. Düşük Isıl Genleşme                       | 8                      |
| 2.2.1.8. Yüksek Sıcaklık Dayanımı                  | 9                      |
| 2.2.2. Kalıp Tasarımı                              | 9                      |
| 2.2.3. Isıl İşlem                                  | 9                      |
| 2.2.4. Kullanım ve İşletme Koşulları               | 10                     |
| 2.3. Kalıplarda Görülen Hasar Mekanizmaları        | 11                     |
| 2.3.1. Sıvı Metal Korozyonu                        | 12                     |
| 2.3.1.1. Korozyona Etki Eden Faktörler             | 12                     |
| 2.3.2. Erozyon ve Yapışma                          | 14                     |
| 2.3.2.1. Erozyon                                   | 15                     |
| 2.3.2.2. Yapışma                                   | 17                     |
| 2.3.2.3. Erozyon ve Yapışmaya Etki Eden Faktörler  | 19                     |
| 2.3.3. Termal Yorulma                              | 21                     |
| 2.3.3.1. Sıcak Yorulma Çatlakları (Isıl Çatlaklar) | 22                     |
| 2.3.4. Büyük Çatlaklar                             | 24                     |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4. Kalıp Ömrünü Arttırmanın Yolları                                     | 24        |
| 2.5. Kaplama Teknikleri                                                   | 25        |
| 2.5.1. Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB)                                    | 25        |
| 2.5.2. Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB)                                    | 27        |
| 2.5.2.1. Elektron Demeti ile Ergitmeye Dayalı Teknikler                   | 29        |
| 2.5.2.2. Sıçratmaya (Sputtering) Dayalı Teknikler                         | 29        |
| 2.5.2.3. Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniği                            | 29        |
| 2.6. Sert Seramik Kaplama Uygulamasının Sağladığı Faydalar                | 31        |
| 2.7. Krom Nitrür (CrN) İnce Film Kaplamalar                               | 33        |
| 2.7.1. CrN Kaplamaların Özellikleri                                       | 33        |
| 2.7.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü                                                | 33        |
| 2.7.1.2. Korozyon Davranışı                                               | 34        |
| 2.7.1.3. Aşınma Davranışı                                                 | 34        |
| 2.7.1.4. Oksidasyon Davranışı                                             | 34        |
| 2.7.2. CrN Kaplamaların Diğer Sert Seramik Kaplamalarla Karşılaştırılması | 36        |
| <b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>                                             | <b>39</b> |
| 3.1. Giriş                                                                | 39        |
| 3.2. Saha Çalışmaları ve Deneysel Çalışmalar                              | 39        |
| 3.2.1. Saha Çalışmaları                                                   | 40        |
| 3.2.2. Deneysel Çalışmalar                                                | 42        |
| 3.2.3. Numune Hazırlama                                                   | 43        |
| 3.2.4. Kaplama Parametreleri                                              | 44        |
| 3.2.5. Kalınlık Ölçümleri                                                 | 44        |
| 3.2.6. Sertlik Ölçümleri                                                  | 44        |
| 3.2.7. Yüzey Pürüzlülüğü                                                  | 45        |
| <b>4. SONUÇLAR ve İRDELEME</b>                                            | <b>46</b> |
| 4.1. Ön Karakterizasyon Sonuçları                                         | 46        |
| 4.2. Saha Çalışmalarının Sonuçları ve İrdelenmesi                         | 47        |
| 4.3. Deneysel Çalışmaların Sonuçları ve İncelenmesi                       | 48        |
| 4.3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Numunelere Ait SEM Görüntüleri    | 50        |
| <b>5. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b>                                      | <b>54</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                          | <b>56</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                           | <b>59</b> |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Sektörlere Göre Ortalama Kalıp Ömürleri.....                                                 | 4               |
| <b>Tablo 2.2.</b> Kalıp malzemesi olarak kullanılan sistemlerde termal çevrim .....<br>sırasında oluşan fazlar | 35              |
| <b>Tablo 2.3.</b> Yaygın olarak kullanılan bazı sert seramik kaplama türlerinin .....<br>özellikleri           | 36              |
| <b>Tablo 3.1.</b> Tesiste Al döküm parçalara ait üretim planları ve gerçekleşme .....<br>oranları              | 40              |
| <b>Tablo 3.2.</b> Oluşan hataların kayıp süredeki paylarının kalıplara göre oranı .....                        | 41              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Sert seramik kaplama uygulaması sonucu sağlanması beklenen .....<br>faydalar                 | 41              |
| <b>Tablo 3.4.</b> Kullanılan kalıp çeliği ve alüminyum alaşımının bileşimleri.....                             | 43              |
| <b>Tablo 3.5.</b> İnce film CrN kaplamaların temel kaplama parametreleri.....                                  | 44              |
| <b>Tablo 4.1.</b> Saha çalışmalarında kullanılan maçalara ait ön karakterizasyon .....<br>sonuçları            | 46              |
| <b>Tablo 4.2.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan maçaların ön karakterizasyon .....<br>sonuçları             | 46              |
| <b>Tablo 4.3.</b> Kaplı maçalara ait saha çalışmaları sonuçları.....                                           | 48              |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|             |                                                                         |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Basınçlı döküm işleminde bir baskının aşamaları .....                   | 3  |
| Şekil 2.2.  | Kalıp ekonomisine yansıyan parametrelerin şematik gösterimi.....        | 5  |
| Şekil 2.3.  | Kalıp ömrüne etki eden temel parametreler .....                         | 5  |
| Şekil 2.4.  | Alüminyumun basınçlı dökümünde görülen hasar mekanizmaları .....        | 11 |
| Şekil 2.5.  | Çinko, alüminyum ve bakır alaşımlarında korozyon .....                  | 13 |
|             | başlangıcı – döküm sıcaklığı ilişkisi                                   |    |
| Şekil 2.6.  | Kalıp yüzeyinin döküm esnasında maruz kaldığı .....                     | 14 |
|             | koşulların şematik gösterimi                                            |    |
| Şekil 2.7.  | Çelik ve sıvı metal partikülleri arasında oluşan erozyonun.....         | 16 |
|             | şematik gösterimi                                                       |    |
| Şekil 2.8.  | Bir basınçlı döküm kalıbının erozyon sonucu hasara uğramış .....        | 16 |
|             | bölgesinin görüntüsü                                                    |    |
| Şekil 2.9.  | Döküm çevriminde erozyon sebebiyle oksit tabakasının .....              | 17 |
|             | aşamalı olarak erimesi                                                  |    |
| Şekil 2.10. | H13 çeliğinden imal edilmiş bir kalıbın kullanım sonrası .....          | 18 |
|             | derinlik profili                                                        |    |
| Şekil 2.11. | H13 çeliği ve sıvı alüminyum alaşımı arasında oluşan intermetalik ..... | 18 |
|             | fazlar.                                                                 |    |
| Şekil 2.12. | Yapışma ve sıyrılmaya etki eden parametreler.....                       | 19 |
| Şekil 2.13. | Basınçlı döküm prosesinde termal çevrim döngüsü ve .....                | 21 |
|             | oluşan gerilmeler                                                       |    |
| Şekil 2.14. | Sıcak yorulma çatlağı fotoğrafı .....                                   | 22 |
| Şekil 2.15. | Temperleme sıcaklığı ile çeşitli çeliklerin çekme dayanımlarının .....  | 26 |
|             | değişimi                                                                |    |
| Şekil 2.16. | FSB tekniklerinin genel olarak sınıflandırılması .....                  | 29 |
| Şekil 2.17. | Çift katotlu bir ark FSB sisteminin şematik görünümü .....              | 30 |
| Şekil 2.18. | Sıcaklık artışı ile CrN yapısında oluşan fazlar.....                    | 35 |
| Şekil 3.1.  | Termal yorulma deney sisteminde kullanılan kalıp ve maçaların .....     | 42 |
|             | şematik görüntüleri                                                     |    |
| Şekil 3.2.  | Daldırma testi (dip test) deney düzeneğinin şematik görünümü.....       | 43 |
| Şekil 3.3.  | Deneyisel çalışmalarda kullanılan kalıbın fotoğrafı.....                | 43 |
| Şekil 4.1.  | Kaplamalı ve kaplamasız maçaların saha uygulama sonuçları.....          | 47 |
| Şekil 4.2.  | Kaplanan maçaların fotoğrafları (a) Basınçlı döküm işleminden .....     | 48 |
|             | önce (b) işleminden sonra                                               |    |
| Şekil 4.3.  | Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunelerin deney sonuçları.....      | 49 |
| Şekil 4.4.  | a)8 000, b)17 000 baskıdan sonra kaplamasız maçaların görünümü.....     | 49 |
| Şekil 4.5.  | CrN kaplı maçanın 35 000 baskıdan sonraki görüntüsü.....                | 50 |
| Şekil 4.6.  | a) CrN kaplı b) kaplamasız maçaların sıvı alüminyum ile temas .....     | 51 |
|             | eden yüzeylerinin SEM görüntüleri (10 kV, x35 büyütme)                  |    |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.7.</b> Kaplamasız maçanın kesitten alınan SEM görüntüsü .....           | 52 |
| (BSE, 10 kV, x2000)                                                                |    |
| <b>Şekil 4.8.</b> CrN kaplı numunenin 35 000 baskıdan sonra kesitten alınmış ..... | 53 |
| SEM görüntüsü (BSE, 15 kV, x1000)                                                  |    |

## **BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARINDA SERT SERAMİK KAPLAMA UYGULAMASI İLE PERFORMANS ARTIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

### **ÖZET**

Son yıllarda alüminyum enjeksiyon döküm kalıplarında malzeme ve ısıtım işlem seçimi, kalıp yüzey işlemlerinin ve sert seramik kaplamaların enjeksiyon döküm kalıp ve maça ve aksamalarında kullanılabilme potansiyelinin araştırılması günümüz koşullarında üretim maliyetlerinin ve ürün kalitesinin geliştirilmesine yönelik olarak üzerinde yoğun araştırmalar yapılan bir konudur.

Bu çalışmada kalıp, maça ve iticilere uygulanan yüzey işlem ve sert seramik kaplama uygulamaları, kalıp kalitesi geliştirilmesi ile ürün kalitesi ve verimliliğın artırılmasına yönelik çalışmalar bir uygulama örneğı çerçevesinde ortaya konmuştur.

Çalışma kapsamında saha çalışmalarıyla CrN kaplamalı maçaların performansları belirlenirken, deneysel çalışmalarla da optimum döküm koşulları belirlenmiş ve deney maçalarında hasar analizi yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar çerçevesinde ise maçalara uygulanan CrN sert seramik kaplamaların, maçalarda yoğun olarak görülen korozyon, erozyon, yapışma ve termal yorulmaya karşı dirençlerini ve ömürlerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Saha çalışmaları kapsamında kullanılan CrN kaplı numuneler, kaplamasız numunelere göre 2 kat kadar daha uzun ömür sergilemişlerdir. Deneysel çalışmalarda ise kaplamasız numuneler 17 000 baskıdan sonra kullanılamaz hale gelirken, CrN kaplı numuneler 35 000 baskıdan sonra bile hala iyi durumdadırlar. Bunun yanı sıra kaplamasız numunelerin işlem sırasında yüzeylerine yapışan alüminyum tabakasının temizlenmesi için zaman zaman üretim durdurulmuştur. Kaplamalı numunelerde ise işlem sırasında herhangi bir durma olmaması ek bir avantaj olarak yorumlanmıştır.

Yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmalarında 35 000 baskı sonrasında bile CrN tabakasının bozulmadığı ve kalıp çeliğini halen korumakta olduğu gözlemlenmiştir.

## **INVESTIGATION OF PERFORMANCE INCREASE OF DIECASTING MOULDS BY USING CERAMIC THIN FILMS DEPOSITION**

### **SUMMARY**

In recent years, there have been extensive investigations on mould material and their heat treatment processes selection, surface treatment and the potential of hard ceramic coating in aluminum diecasting moulds, cores, pins to improve product cost and quality.

In this study, a series of experiments were made to evaluate the effects of surface treatment and hard coating applications on aluminum diecasting pins. In addition to this, to improve product quality and increase productivity, practical die casting experiments were conducted by using hard ceramic coated pins during the diecasting process. And, a comparison was made among both the experimental and practical performance results of CrN coated pins.

This study clearly showed a distinctive effect of CrN coatings on aluminum diecasting pins. Furthermore, not only an increase in the lifetime of pins but also a significant improvement in product quality are observed.

In situ investigations showed that coated pins have two times or more service lifetime than the uncoated ones. Experimental results also prove this situation. Uncoated pins were not useful after 17 000 shots, in the experimental work where CrN coated pins performed over 35 000 shots. Beside this result, uncoated pins stopped the production several times for their surface cleaning during the cycles. With coated pins there were no such stops in the process. This situation provides an extra advantage to the CrN coated pins.

During SEM investigations, an almost intact layer of CrN was seen between the aluminum and mould material. The layer was still protecting the die steel.

## 1. GİRİŞ

Basınçlı dökümle seri üretimde ekonomik faktörler, genellikle malzeme, işlem prosesi, yüzey işlem ve yağlama sistemi üzerindedir. Ek parametreler olarak; işlem giderleri, makina bakım, maça temizlemeleri, kalıp tamiri ve kalite kontrol gösterilebilir. Sonuç olarak, döküm prosesini geliştirmek temel olarak kalıp ömrünü arttırmaktan geçmektedir.

Basınçlı döküm prosesinin en önemli bileşenlerinden biri olan kalıplar, üretimi zor ve pahalı parçalardır. Ürün kalitesi, üretim verimliliği ve dolayısı ile de üretim maliyetleri açısından uzun ömürlü olmaları ve sorunsuz çalışmaları beklenen sistemlerdir. Kalıplar, basınçlı döküm sektöründe, kullanım alanlarına göre değişik zorlanmalarla karşı karşıya kalmaktadırlar. Kimi yerde yüksek sıcaklıklar, kimi yerde hızla değişen ısınma ve soğumalar, kimi yerde şiddetli aşınmalar ya da çarpmalar altında çalışmak zorundadırlar. Diğer taraftan, sıvı alüminyumun demirle reaksiyonu sonucu oluşan korozyona ilave olarak, kalıp ayırıcı olarak tanımlanan sıvıların kullanımının yüksek sıcaklık koşulları ile birleşmesi sonucu, söz konusu olan yüksek sıcaklıktaki korozyon koşulları kalıpların ömürlerini azaltmaya yönelik zorlayıcı koşulları oluşturan mekanizmalar olarak devrededirler. Kalıplar bu etkileri karşılayacak özelliklere sahip olmalıdırlar. Çelik üreticileri, sanayi geliştikçe kalıp yapımında kullanılmak üzere artan özellik gereksinimlerini karşılayabilecek yeni çelikler geliştirmeye çalışırken; araştırmacılar da modern sanayi uygulamalarındaki kalıp ömrünü arttıracak temel olguları daha iyi anlayabilmek ve geliştirme önerileri üretmek için çalışmaktadırlar.

Bir metal enjeksiyon kalıbının ömrü; öncelikle kalıp üretiminde kullanılan kalıp çeliğinin bileşimine, yapısal özelliklerine, çelik ve üretim yönteminin kalitesine bağlıdır. Kalıp ömrüne etki eden diğer faktörler ise kalıbın boyut ve şekli, kalıp üretim teknikleri, üretim ortamı, kalıp bakım periyodu ve ısıtma işlem özellikleridir. Kalıpların servis ömürleri, üretimi yapılan parça sayısına göre belirlenir. Son dönemlerde basınçlı döküm prosesinde kullanılan kalıpların ömürlerini arttırmaya yönelik çalışmalar özellikle iki temel başlık altında özetlenebilir:

1. Yeni kalıp malzemelerinin üretimi, özelliklerinin geliştirilmesi ve kalıp imalat teknolojilerindeki gelişmeler
2. Kalıp yüzey özelliklerinin geliştirilmesi

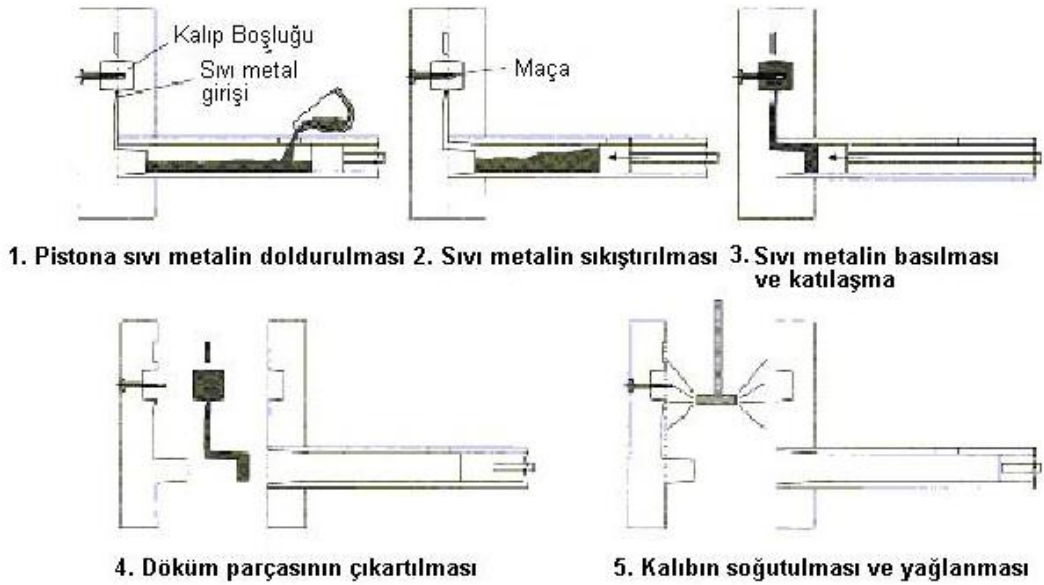
Birinci grupta belirtilen, amaca yönelik olarak yürütülen çalışmalar kapsamında kalıp üretiminde kullanılacak yeni çelik türlerinin bileşim ve yapısal özellikler (ısıl işlem) açısından geliştirilmesi ve söz konusu çeliklerden uygun kalıp üretimini gerçekleştirecek kalıp üretim yöntemlerinin geliştirilmesi hedeflenirken, ikinci grupta belirtilen çalışmalarda döküm prosesi süresince kalıbın karşı karşıya kaldığı zorlanmaların yüzey özelliklerinde yapılacak değişikliklerle geliştirilmesi hedeflenmektedir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1 Basınçlı Döküm

Basınçlı döküm, temel olarak, dökümü yapılacak parçanın kalıbı içerisine, sıvı metali belirli bir basınç ile enjekte etmek suretiyle döküm parçasının imal edilmesi olarak adlandırılabilir.

Bugün yüksek kalitedeki alüminyum döküm parçaları, metal kalıplar ile basınçlı döküm yöntemi ile üretilmektedir. Diğer döküm yöntemleri ile karşılaştırıldığında basınçlı döküm, seri üretimde yüksek döküm kapasitesi ve ölçüsel olarak dar toleranslar arasında kalarak üstün yüzey işlem, gelişmiş mekanik özellikler ve düşük maliyetlerle özellikle otomotiv sektörü için hizmet sunmaktadır [1].



Şekil 2.1. Basınçlı döküm işleminde bir baskının aşamaları [2].

Şekil 2.1’de basınçlı döküm işleminde bir parçanın üretilmesi için gerekli kademeler şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre bir çevrim, sırasıyla baskı pistonuna sıvı metalin doldurulması, sıvının kalıp içerisine basınçla itilmesi, basınç altında katılaşma, döküm parçasının çıkarılması ve kalıbın soğutulması, yağlanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamaların her birinde kullanılan kalıp ve maçalara

çeşitli hasar mekanizmaları etki etmektedir ve bu mekanizmalar kalıpların ömürleri kısalmaktadırlar [2].

## 2.2 Kalıp Ömrüne Etki Eden Faktörler

Kalıp ömrü, basınçlı döküm prosesinde büyük bir ekonomik önem arz etmektedir. Kalıplar, üretilen parçanın şeklinin karışıklığına ve kalıbın büyüklüğüne bağlı olmak üzere USD 50.000 civarında maliyetlerle üretilmektedirler. Kalıp ömrü, üretilen parça kalitesine göre 20.000 ile 250.000 baskı arasında değişebilmektedir. Buradan görülebileceği gibi, servis süresince kalıp çekirdeği ve maçaları yüksek sayıda termomekanik çevrimlere maruz kalmaktadır. Genelde ticari kalıp yağlayıcıları ve kalıp temizleyici mamuller, her çevrimde aşınmayı azaltmak, soğutucu olarak kullanılmak ve döküm parçasının kolay alınmasını sağlamak amacı ile kalıp yüzeyine uygulanmaktadır [3].

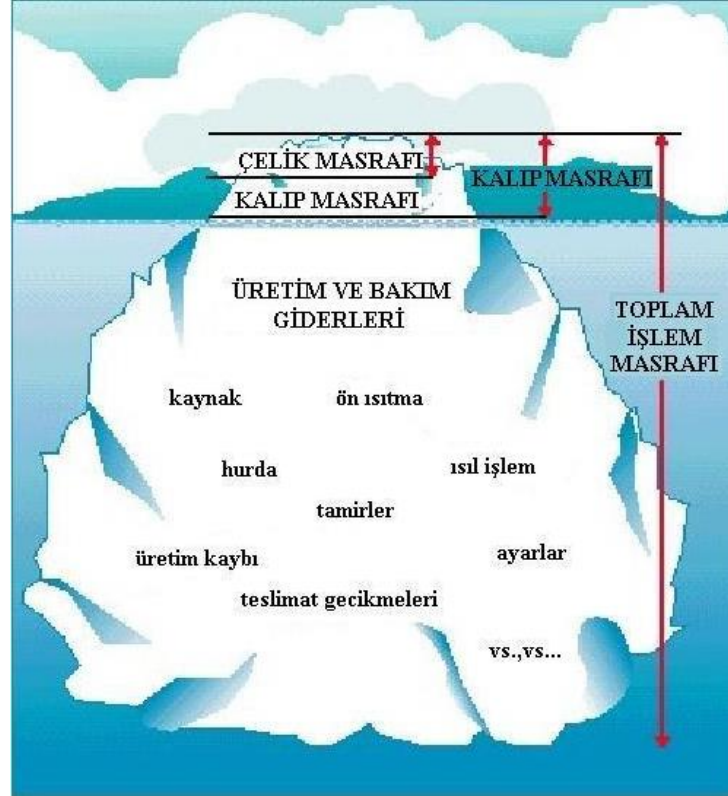
Tablo 2.1’de ortalama kalıp ömürleri hakkında genel bilgiler yer almaktadır [4].

Tablo 2.1. Sektörlere göre ortalama kalıp ömürleri [4].

| Döküm Alaşımı | Döküm Sıcaklığı / °C | Kalıp Ömrünü Etkileyen Faktörler       | Normal Kalıp Ömrü<br><u>Kalıp</u> <u>Maca</u> |                     |
|---------------|----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| Çinko         | 800 / 430            | Erozyon                                | 500 000 - 2 000 000                           | 500 000 - 2 000 000 |
| Magnezyum     | 1200 / 650           | Termal Yorulma<br>Çatlama<br>Erozyon   | 100 000 - 400 000                             | 100 000 - 400 000   |
| Alüminyum     | 1300 / 700           | Termal Yorulma<br>Çatlama<br>Erozyon   | 60 000 - 200 000                              | 40 000 - 150 000    |
| Bakır/Pirinç  | 1780 / 970           | Termal Yorulma<br>Erozyon      Çatlama | 5 000 - 50 000                                | 1 000 - 5 000       |

Tablo 2.1’den de görülebileceği üzere özellikle alüminyumun basınçlı dökümü için kalıbın genelde 100.000-200.000 baskı yapması beklenmektedir. Basınçlı döküm sektöründe seri üretimde tasarruf yapılabilecek alanlar arasında en önemlileri kalıp malzemesi, üretim prosesi, yüzey işlem ve yağlama olarak sıralanabilir. Ek parametreler; takım gereklilikleri, makine ayarları, kalıp temizliği, kalite kontrolleri olarak maliyete yansımaktadırlar [4].

Kalıp sisteminde yapılan tüm iyileştirmeler kalıp ömrünü uzatmaya ve maliyetleri düşürmeye yaramaktadır. Kaliteli çeliklerin üretilmesi kalıp ekonomisi gelişiminde son derece önemli bir rol oynamaktadır [4].



Şekil 2.2. Kalıp ekonomisine yansıyan parametrelerin şematik gösterimi [4].

Şekil 2.2’de “Maliyet Iceberg”’inde de görüldüğü üzere kalıp çeliği ve kalıp çeliği yapımı %10 gibi bir yüzdeye karşılık geliyor ise, kalıp ömrüne olan etkisi düşünüldüğünde kaliteli bir çelik kullanımının bir gereklilik olduğu ortaya çıkmaktadır. Kalıp ömrüne etki eden en önemli faktörler, çelik malzemesi, ısıtma işlemi ve döküm prosesinin işlem esnasında kontrolüdür [4].



Şekil 2.3. Kalıp ömrüne etki eden temel parametreler [5].

Kalıp malzemesi harcamalar arasında % 5-15 arasında yer tutarken, ısıtım işlem maliyeti % 5-10 arasında yer işgal etmektedir. Isıtım işlem de diğer yüzey işlemleri ile birlikte kalıp ömrünü arttırmaya yönelik önlemler arasında yer almaktadır [4].

Kalıp ömrüne etki eden temel faktörler aşağıda, şekil 2.3'teki diyagramda görülebileceği gibi uygun çelik seçimi, kalıp tasarımı, ısıtım işlem ve kullanım ve bakım koşullarıdır [4].

### **2.2.1 Uygun Çelik Seçimi**

Kalıp performansını arttırmanın ilk ve en önemli yolu kalıp yapımında kullanılacak çeliğin doğru seçilmesinden geçmektedir. Diğer taraftan çelik üretimi en iyi koşullarda ve istenilen özellikleri sağlayacak şekilde üretilmelidir. Basınçlı döküm koşullarına karşı koyabilecek bir çeliğin sahip olması gereken özellikler aşağıda özetlenmiştir.

#### **2.2.1.1 Yapısal Homojenlik**

Basınçlı döküm kalıpları, ergimiş metalin yüksek basınç altında kalıba enjekte edilmesi sonucu, periyodik olarak ısısal şoka maruz kalırlar. Eğer kalıp yüzeylerinde, çok küçük de olsa, bir noktada herhangi bir hata mevcut ise, sıvı metalin yüksek hızla çarpması sonucu hata boyutu büyüyecektir. Gözle görülmeyecek derecede ufak çatlak ve katmerler, birkaç yüz parçanın dökümünden sonra rahatça tespit edilebilecek duruma gelirler. Çeliğin yapısında bulunması muhtemel, metal olmayan küçük parçalar ve mikroskobik alaşım elementi toplanmaları, bir kalıp arızasının başlangıcı olacaktır. Alaşım ayrımı da kalıplarda yüzey hatalarına sebep olur ve kalıp ömrünü azaltır. Çatlak, katmer ve gözenek kalıp yüzeyinde asla müsaade edilemeyecek hatalardandır. Bu tip hataların boyutları büyük ise kalıbı mekanik bakımdan zayıf düşürür, ömrünü azaltırlar. Kalıba, maksimum saflık ve homojenlik kazanabilmesi maksadıyla, uygun sıcaklıklarda ısıtım işlemleri uygulanmalıdır [6].

#### **2.2.1.2 Yüksek Sertlik**

Kalıbın aşırı gerilmelere ve deformasyona karşı direncini gösterir. Basınçlı döküm kalıp çelikleri, kalıbın kapanması ve sıcak metalin dökümü sırasında oluşan yüksek basınçlarının sebep olacağı görünüş bozukluğu ve deformasyonları karşılayabilmek için yeterli sertlik ve dayanımda olmak zorundadır [6].

### **2.2.1.3 Yüksek Tokluk**

Tokluk, kalıbın kırılmadan, plastik deformasyona gösterdiği dirençtir. Basınçlı döküm kalıplarında kalıp malzemesinin kopma dayanımı üzerindeki yüklemeler ile meydana gelen gerilmeler, moleküler çatlama ve kırılmalara yol açar. Bu tip gerilmeler keskin köşelerde veya kavislerde oluşur. Gerilim yığılmaları böyle bölgelerde ani çatlamalara sebep olur ve gelişen çatlaklar kalıbın ömrünü kısaltır. Bu tip durumlarla karşılaşmamak için keskin köşelerden kaçınılmak suretiyle bir kalıp tasarımı yapılmalı ve gerilim yığılmalarını dağıtıp, dengeleyebilecek bir kalıp çeliği seçilmelidir. Termal yorulma başlangıcında yüksek tokluk, belirli sıcak akma mukavemetinde ve sıcaklık çevriminde çatlaklar başlamadan önce çevrimleri absorbe etmeye yarar [6].

Kırılabilirliği önlemek için kalıbın olabildiğince tok olması gerekmektedir. Fakat tokluk, diğer istenen özellikler olan sertlik ve aşınma direnci ile ters orantılı olarak gelişmektedir. Çeliklerin tokluk özellikleri inklüzyonlar ve segregasyonlara bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir, bununla birlikte çeliğin saflığı ve homojenliği de son derece önemlidir. Bundan dolayı sıcak işlem çelikleri özel yöntemlerle üretilmelidir. Çeliğin tokluğu, özel ısıtma ve saflaştırma teknikleri, kontrollü dövme prosesi ve özel mikroyapı işlemleri ile geliştirilir [7].

### **2.2.1.4 Yüksek Süneklik**

Temper dayanımı ile yumuşama genellikle mekanik yüklemeler ile ilgilidir. Kalıp malzemesi, hem yüksek sıcaklığa hem de mekanik yüklenmelere maruz kalmaktadır. İyi bir kalıbın, yüksek sürünme dayanımı sayesinde, yüksek sıcaklık ve mekanik etkilerin birleşik etkilerine karşı koyabilen bir yapıda olması beklenir. Yapılan deneyler görülebileceği üzere; sıcak yorulma çatlakları, devamlı sıcaklık ve mekanik yükleme çevrimleri ile oluşmaktadır [4].

### **2.2.1.5 Yüksek Aşınma Direnci**

Kalıp içine yüksek hızla enjekte edilen sıvı metalin, temas ettiği yüzeyleri aşındırıcı etkisi vardır. Aşınma miktarı, derecesi ve frekansı büyük ölçüde yolluk konstrüksiyonuna bağlıdır. Kalıbın maruz kalacağı çalışma şartları göz önüne alındığında, bu aşındırıcı etkiye karşı koymas ve boyutsal toleransların dışına çıkmaması gerekir [6].

#### **2.2.1.6 Yüksek Isıl İletkenlik**

Basınçlı döküm kalıpları için en önemli hata türlerinden biri ısıl çatlaklardır. Bu çatlamlar kalıp yüzeylerinde, küçük kılcal çatlaklar halinde veya ağ şeklinde görülür. Ergimiş metalin yüksek basınç altında kalıba enjekte edilmesi ile kalıp yüzeyine çarpan metalin, yüzeyi çok sıcak hale getirmesi sonucu bu tip hatalar ortaya çıkar. Böylelikle kalıp yüzeyinin sıcaklığı, ergimiş metal sıcaklığına erişmektedir. Kalıp yüzeyinin sıcaklığı, normal sıcaklıktan ergimiş metal sıcaklığına 1/1000 saniyeden daha kısa zamanda ulaşmaktadır. Kalıp yüzeyinin sıcaklık artışı, dökülen metalin cinsine ve kalıp yüzeyinin orijinal sıcaklığına da bağlıdır. Ancak kalıbın her bölgesinde aynı sıcaklık artışı görülmez. Kalıp yüzeyinin sıcaklığı, kalıp bloğunun iletkenliği dolayısıyla soğuyarak normal sıcaklığa döner. Bu dönüş, yüzeysel çekilmelere sebep olur. Çünkü, ısınma anında plastik akmanın meydana geldiği yüzeyde, soğuma sırasında gerilmeler ortaya çıkar. Belli sayıda döküm çevrimi sonucunda da çatlaklar görülür [7].

Isıl çatlaklar, daha çok alüminyum ve bakır alaşımları gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin döküldüğü kalıplarda görülür. Bu gibi durumları önlemek için metalin döküleceği uygun kalıp çeliğinin bulunması gereklidir. Çelikte, ısıl çatlamlarda, fiziksel özellikler olan ısıl iletkenlik ve allotropik değişimler de önemli rol oynar. Yüksek ısıl iletkenlik, ısı gradyanlarını ve dolayısıyla ısıl gerilmeleri indirger. Kalıp çeliğinin ısıl iletkenliği, dökülen parçanın kalıpta donması için ne kadar süre kalması gerektiğinin kararlaştırılmasındaki temel unsurlardan biridir. Parça, kalıp içerisinde ne kadar az sürede donarsa, kalıp sıcaklığı o kadar az yükselir. Döküm hızı ile kalıbın ısı iletimi birbirine uyduğunda, en verimli çalışma devresine girilmiş olunur. Dökümün kalıp yüzeyine bıraktığı ısı, değinildiği gibi kısa bir zaman aralığında, büyük bir değerdedir. Kalıp yüzeyinin ince bir kısmında, sıcaklık yükselmesini daha normal çerçeve içinde tutabilmek için, ısıl iletkenliğin en büyük değere ulaştırılması hataları önler [7].

#### **2.2.1.7 Düşük Isıl Genleşme**

İşlem sıcaklığında, kalıp ölçü değişmelerini ve ısıl çatlamları azaltması bakımından kalıp çeliğinin düşük ısıl genleşmeye sahip olması istenen bir özelliktir. Kalıbın değişik bileşenleri farklı sıcaklıklarda çalıştıklarından, bu değişimler sonucu oluşan ölçü farklılıkları, kalıp çeliğinin ısıl genleşme katsayısına bağlıdır. Hareketli veya

sabit maçaların genleşme katsayıları kalıp çeliğinkinden daha büyük iseler, çalışma koşulları altında kalıp sıcaklığı artacağından, sıkıştır ve arızalara sebep olurlar [6].

#### **2.2.1.8 Yüksek Sıcaklık Dayanımı**

Yüksek sıcaklık dayanımı plastik deformasyonu azaltır ve ısı yorulmayı azaltıcı yarar sağlar. Kalıbın işlem sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara dayanım gösterebilmesi, işlem sıcaklığında performansının daha yüksek olacağının bir ölçüsüdür. Kalıp, ani sıcaklık değişimlerinin yanı sıra, yüksek işlem sıcaklıklarında da bir süre kaldığı için, bu sıcaklıklarda göstereceği performans da büyük önem taşımaktadır [6].

#### **2.2.2 Kalıp Tasarımı**

İyi ve doğru bir tasarım, sorunsuz bir uygulama için önemli ve gereklidir. Eğer tasarım uygun değilse, çatlama ya ısı işlem sırasında oluşur ya da çalışma sırasında beklenmedik bir anda ortaya çıkar ve üretimi aksatır. Bir kalıbın tasarımı sadece boyut ve biçim gözönüne alınarak yapılmaz; tasarımcı mutlaka seçilecek çeliğin hangi koşullarda çalışacağını da düşünmek zorundadır. Tüm kalıpların atlamalarının ve kırılmalarının sebebi, temel olarak 2 parametreyle ilgilidir: keskin köşelerin varlığı ve ani kesit ya da kalınlık değişimleri. Keskin köşeler, gerilim yükseltici noktalar olarak değerlendirilir. Keskin köşeleri gidermek ve açılı köşeler kullanmak kalıp tasarımının esaslarındandır. Aynı şekilde, ani kesit daralmaları ve kalınlık değişimleri de mümkün derecede azaltılarak kalıbın zamansız hasara uğraması engellenebilir [8].

#### **2.2.3 Isıl İşlem**

Isıl işlem, bir döküm kalıbının termal yorulma ve büyük çatlaklara direncinin arttırılmasında önemli bir yere sahiptir.

Tüm elikler ısıtıldıklarında, ferrit yapısı daha sıkı dokulu ostenit fazına dönüşür ve kristal yapının boyut farklılığından kaynaklanan sorunlar ortaya çıkar. Bu ekme olgusu, ısıtılan metalin genleşmesine karşı zıtlık oluşturduğundan, hızlı ısıtılmalarda, büyük kesit farklarının ve keskin köşelerin bulunduğu noktalarda çatlamalara yolaçabilir. Bunu önlemek için ısıtma hızı düşürülmeli ya da ötektoid sıcaklığı altında bir ön ısıtma ile sıcaklık eşitliği sağlayıp çekme - genleşme zıtlığının yarattığı etki hafifletilmelidir. Ostenitleme işlemi yalnızca ostenit evresini oluşturmakla

kalmaz, aynı zamanda iç yapıdaki alaşım karbürlerinin çözünmesini de sağlar. Ancak, karbürlerin çözünmelerini kolaylaştırmak amacıyla kalıplara, ötektoid sıcaklığı altındaki ( $<723\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) birinci ön ısıtmaya ek olarak, ötektoid sıcaklığı üstünde de ikinci, hatta üçüncü bir ön ısıtma uygulanabilir. Ostenitleme sıcaklığı gereğinden yüksek seçilirse, içyapıda aşırı tane büyümesi ile karşılaşılabilir ve iri taneli çeliklerin tokluklarının düşük olduğundan çatlama olasılığı doğar [8].

Isıl işleme ilişkin, kalıplarda en yaygın olarak görülen çatlama nedenleri, suverme işlemi sırasında ve sonrasındaki uygulamalara bağlıdır. Ayrıca suverme işlemi sırasında, soğumanın kalıplarda yarattığı fiziksel çekme olgusu, ostenitin martenzite dönüşmesiyle doğan genleşmeyle tezat oluşturur ve suverme çatlaklarının doğmasına yolaçabilir. Suverme işlemine ilişkin ve çatlamalara yolaçan ikinci bir neden de kalıpların suverme ortamından hemen menevişleme işlemine geçmek üzere çıkartılmamaları ve bekletilmeleridir. Bu gibi durumlarda çatlama olasılığı çok yüksektir. Bunun sebebi martenzitik içyapının yüksek gerilimli bir yapı olmasıdır. Menevişleme işlemine hemen geçilip gerilimler giderilmezse, bu durum “suverme çatlakları” denen çatlakların oluşmasına yolaçabilir [8].

Sözü edilebilecek diğer bir önemli husus da sertleşme işlemine geçmeden önce, özellikle büyük ve karmaşık yapıları kalıplara bir gerilim giderme işlemi uygulanmasıdır. Bazı durumlarda ise, kalıpların yeniden sertleştirme işlemine tabi tutulması önerilebilir. Böyle bir zorunluluk durumunda, kalıp önce tavlmalı sonra sertleştirilmelidir. Hatalı ısıl işlem uygulamalarından kaynaklanan çatlamaların nedenlerini; hızlı ısıtma, aşırı ostenitleme, hatalı suverme, menevişlemede gecikme, karbonsuzlaşma ya da kalın kabuk oluşumu şeklinde sıralayabiliriz [6].

Kalıpların ısıl işlemi sırasında uygulanan hızlı su verme prosesi, ısıl yorulma çatlakları ve büyük çatlaklara karşı kalıp direncinin optimize edilmesini teşvik eder. Bununla beraber aşırı derecede yüksek su verme hızları, çarpılma ve suverme çatlakları oluşumu eğilimi artırır. Ancak, uygulanacak ısıl işlem sonucunda, kullanma sertliğinin artırılabilmesi ve yüksek mikro tokluğa erişilebilmesi amaçlandığı için, ideal olarak bir kalıba olabildiğince hızla su verilmelidir [37].

#### **2.2.4 Kullanım ve İşletme Koşulları**

Bir kalıp, her ne kadar tasarım olarak doğru seçilmiş, yüksek nitelikli bir çelikten yapılmış ve doğru bir ısıl işleme tabi tutulmuş bile olsa, kullanım sırasında mekanik

ve ısıl yükleme yanışları ile alıştırma uygulamalarındaki hatalardan da çatlayabilir. Özellikle basınçlı döküm kalıplarının kullanıldığı uygulamalarda aşırı yüksek sıcaklıkların kullanımı, bu sıcaklıklardaki uzun süreli temas, hızlı ısıtma ve soğutmalar gibi etmenler hem çatlak oluşumunda hem de ilerlemesinde son derece etkilidirler [8].

### 2.3 Kalıplarda Görülen Hasar Mekanizmaları

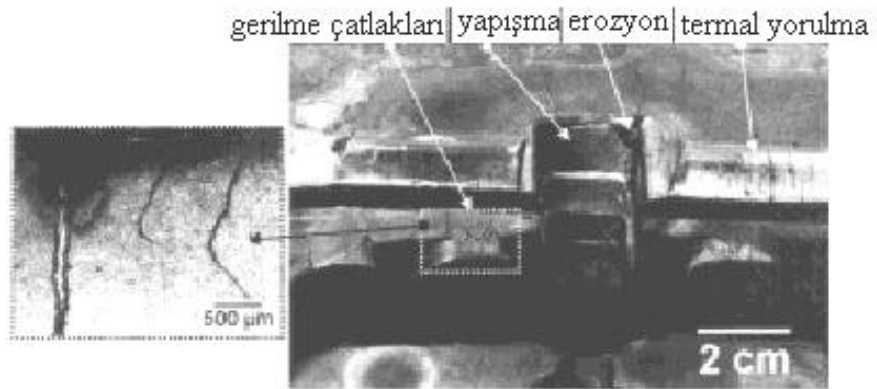
Kalıp özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalarda hedefi belirlemek için öncelikle kalıplarda görülen hasar mekanizmalarına daha yakından bakmak gerekir. Alüminyum basınçlı dökümünde kullanılan kalıplar; döküm alaşımı ile kalıp yüzeyinin etkileşimi sonucu oluşan

- sıvı metal korozyonu,
- erozyon ve
- yapışmalara

bağlı sıyrılma (washout) olgusu ve bunun yanısıra termal yorulmadan kaynaklanan

- sıcak yorulma ve
- büyük çatlaklar

sonucu hasara uğramaktadırlar. Servis süresince kalıpların yüzeylerinin bozulması, dökülecek parça sayısını sınırlamakta ve kalıp ömrünü azaltmaktadır. Basınçlı döküm kalıplarında görülen hasarlar pek çok mekanizmaya bağlıdır [9].



şekil 2.4. Alüminyumun basınçlı dökümünde görülen hasar mekanizmaları [3].

Bu hasar mekanizmalarının kalıp yapısına yansıması şekil 2.4'te görülmektedir. alışan kalıp yüzeyindeki sıyrılma hasarları korozyon, erozyon ve yapışma ile ilişkilendirilmiştir. Termal yorulma sonucu ile oluşan çatlaklar ise daha yüksek büyütme ile şeklin yanında detaylı olarak gösterilmişlerdir [3].

Bu hasarlar, kalıp yüzeyinin sıvı alüminyuma maruz kalması, sıvı alüminyumun hareketi ve dökümün enjeksiyonu, soğuması sonucu oluşmaktadır [3].

### **2.3.1 Sıvı Metal Korozyonu**

Korozyon, genel olarak, metalik malzemelerin çevre ile etkileşimleri sonucu malzeme özelliklerinde fiziksel, kimyasal, mekaniksel, elektriksel olarak meydana gelen değişiklikler ve uğranılan zarar olarak tanımlanabilir.

Döküm işleminde ise, döküm alaşımı (sıvı metal) ve kalıp malzemesi arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu meydana gelen malzeme kaybıdır. Korozyon, sadece çelik ömrünü etkilemekle kalmaz, ayrıca ürünlerin yüzey kalitesini ve geometrisini de etkiler [10].

Basınçlı döküm işlemi sırasında sıvı metal kalıp içine büyük bir hızla enjekte edilmektedir. Yüzeydeki koruyucu tabakanın tahrip olduğu yerlerde, sıvı metal kalıp içine nüfuz etmektedir. Alüminyumun  $\alpha$ -Fe içindeki ve sıvı alüminyum içinde demirin çözünürlükleri sebebiyle pek çok intermetalik bileşik kolayca oluşabilmektedir. Yüzey işlemlerle yapılacak kalıp ömrü artırma çalışmalarında, kalıp yüzeyinin çelikten daha az reaktif olan bir kaplama ile kaplanması bu durumu engellemek adına bir çözüm teşkil edebilir. Bugün uygulanan ileri yüzey işlemler, çeliğin mekanik ve aşınma dayanımını geliştirmeye yönelik iken, pek çoğu da sıvı alüminyum alaşımına karşı korozyon dayanımını arttırmaya yöneliktir. Uygulanan yüzey işlemler çeliğin yüzeyinin, Al alaşımı tarafından ıslatılma özelliğini de azaltmaktadır [10].

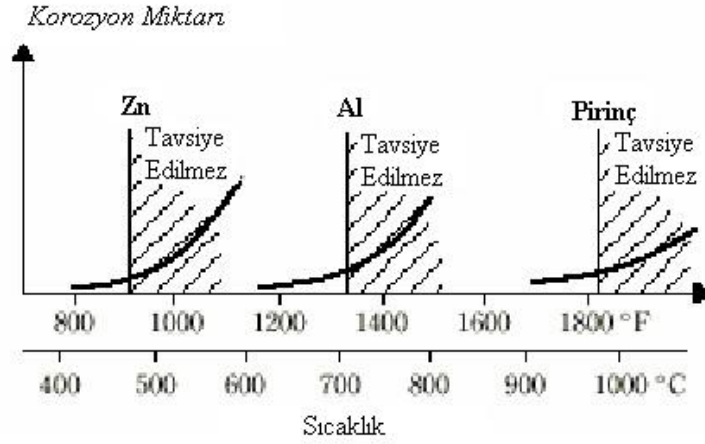
#### **2.3.1.1 Korozyona Etki Eden Faktörler**

Korozyona etki eden faktörler döküm metalinin sıcaklığı, döküm malzemesinin kimyasal bileşimi, kalıp tasarımı ve sıvı metalin ilerleme hızı ve kalıba uygulanan yüzey işlemler olarak sıralanabilirler [4].

##### **a) Döküm metalinin sıcaklığı**

Döküm alaşımları, korozyonun şiddetlendiği kritik sıcaklıklara sahiptirler. Şekil 2.5'te taralı bölgeler tavsiye edilmeyen döküm sıcaklıklarını ifade etmektedirler. Çinko 480°C çelikte reaksiyona girmeye başlarken, bu sıcaklık alüminyumda 720°C civarındadır. Bakır alaşımlarında ise korozyonun başladığı kritik bir sıcaklık yok gibidir; sıcaklık artışıyla birlikte korozyon da artar.

Şekil 2.5'te Zn, Al alaşımları ve pirinç için döküm sıcaklığının artışıyla birlikte, artan korozyon miktarı diyagram şeklinde görülmektedir [4].



Şekil 2.5. Çinko, alüminyum ve bakır alaşımlarında korozyon başlangıcı ve döküm sıcaklığı ilişkisi [4].

#### b) Döküm malzemesinin kimyasal bileşimi

Saf metaller, kalıp malzemesini ticari alaşımlardan daha fazla zarara uğratırlar. Bu durum çinko ve alüminyum için de geçerlidir. Düşük Fe içeriğine sahip sıvı alüminyumda ise daha yüksek bir korozif etki görülür [4].

#### c) Kalıp tasarımı ve sıvı metalin ilerleme hızı

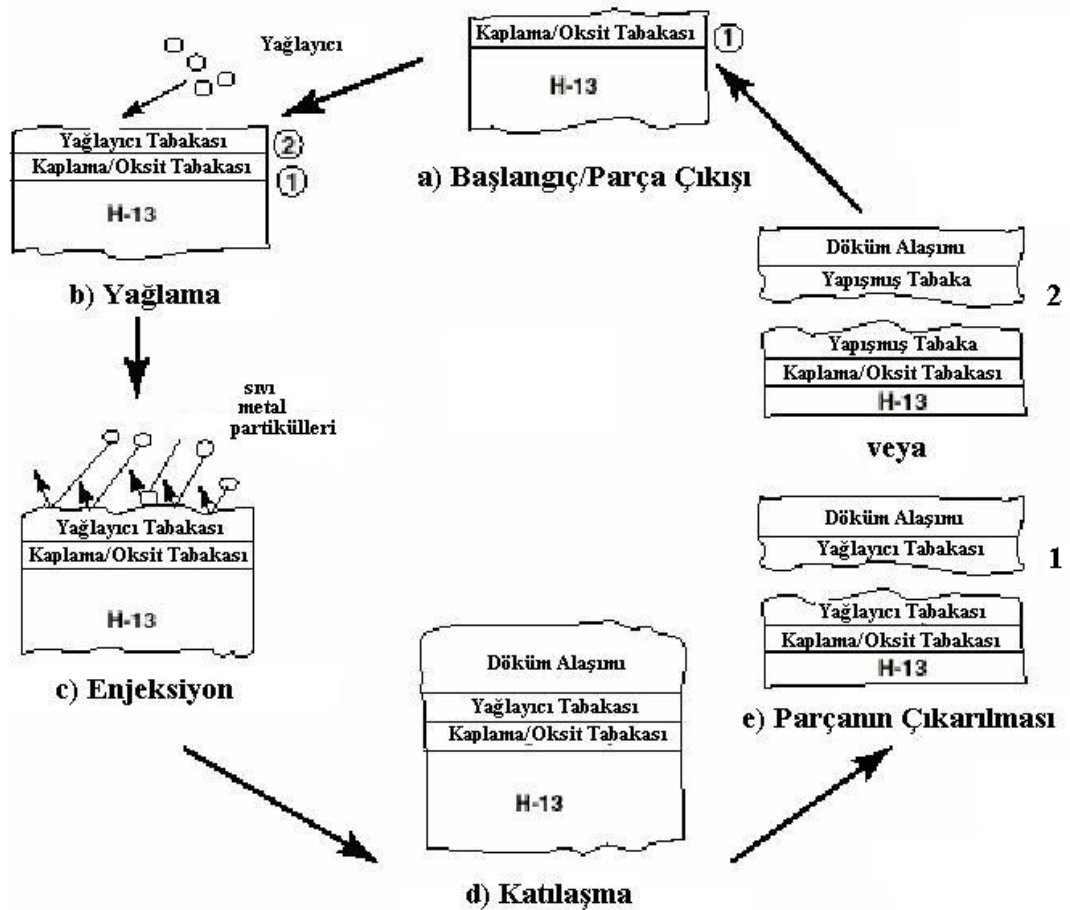
Kalıp tasarımı da korozyon açısından önemlidir. Metal çok yüksek bir hızda kalıp içine enjekte edildiğinde kalıp yüzeyindeki yağlayıcı tabaka yok olabilir. Yüksek enjeksiyon hızının korozif etkisi genelde yanlış yolluk tasarımından ileri gelmektedir [4].

#### d) Kalıba uygulanan yüzey işlem

Kalıp çeliği ile sıvı metal arasındaki kimyasal etkileşimin engellenmesi ile oluşacak korozyonun azaltılması mümkündür. Kalıp yüzeyinde oluşan oksidasyon tabakası korozyona karşı iyi bir koruma sağlar. Oksit tabakası, ıslatma açısını düşürdüğü için çelik-sıvı metal temasını azaltmakta ve böylece korozyonu engellemektedir. Kalıp çeliğinin yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakasının varlığı, malzeme kaybını azaltmaktadır. Nitrüleme veya kalıba uygulanacak diğer yüzey işlemler de korumayı arttırırlar [4].

### 2.3.2 Erozyon ve Yapışma

Erozyon ve yapışma hasar mekanizmalarını anlayabilmek için kalıp yüzeyinin çevrim sırasındaki değişik evreleri incelenmelidir. Şekil 2.6’da bu evreler şematik olarak gösterilmektedir. Oksit tabakası, kalıp yüzeyi ve döküm metali arasındaki yüzeyde birkaç baskıdan sonra oluşur (a). Oksit tabakası ara yüzeyde yapışmış tabakanın oluşumunu engelleyen bir yapı görevi görür. Bundan sonra oksit tabakasının üzerine yağlayıcı sıvı püskürtülür (b). Kalıplar kapandıktan sonra yağlı yüzey sıvı metale maruz kalır (c). Yağlı yüzey, koruyucu tabaka olarak kalıp yüzeyini erozyona karşı korur. Dolum sırasında yağlı tabaka kaybolur (d). Dolum bittiğinde, katılaşma başlar ve yağlı tabaka birkaç dakikalığına katılaşan metal ile karşı karşıya kalır. Eğer yağ tabakası hala efektif ise döküm parçası kalıptan kolayca alınır (e-1). Eğer yağlama katmanının etkisi geçmiş ise yapışma başlar ve yapışmış tabaka kalıp yüzeyi üzerinde kalır (e-2) [11].



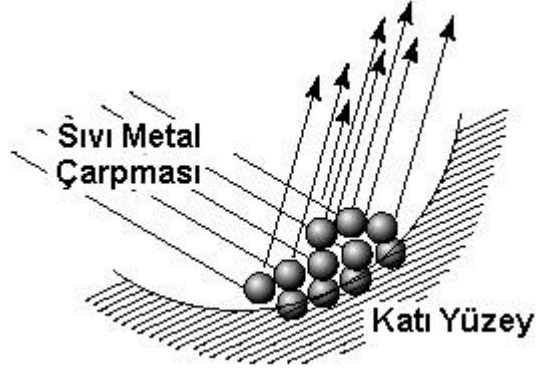
Şekil 2.6. Kalıp yüzeyinin döküm esnasında maruz kaldığı koşulların şematik gösterimi [11].

Kalıp yüzeylerinin sıvı metal ile etkileşimi mekanik ve kimyasal olmak üzere iki açıdan incelenebilir. Mekanik etkileşim, sıvı metal kalıp yüzeyine yüksek hızlarda çarptığında ortaya çıkar. Çarpan sıvı metalden partikül transferi sonucu kalıp yüzeyinden parça kopması durumu ortaya çıkar. Bu mekanik etkileşime erozyon adı verilir. Erozyon aşınması, sıvı metalin kalıp yüzeyine yüksek hızlarda çarpmasından ileri gelmektedir. Sıyırılma etkisi hem erozyon aşınması hem de korozyon aşınması olarak görülebilir. Ancak korozyon, yukarıda da değinildiği üzere; çeliğin sıvı metal içinde çözülmesi ve intermetalik tabakaların oluşması olarak tarif edilmektedir. Kimyasal etkileşim, döküm malzemesi atomları ve kalıp malzemesi atomları arasındaki afiniteye bağlıdır. Bu etkileşim, kalıp malzemesi ve döküm alaşımı arasında intermetalik tabakaların oluşmasına neden olmaktadır. Döküm metalinin ara tabakada oluşan yapısına yapışma adı verilmektedir. Yapışma, genel olarak döküm malzemesinin kalıp malzemesine veya maçalara yapışması olarak da tanımlanmaktadır [11].

Sıyırılma ve yapışma mekanizmaları bir kez meydana geldikleri zaman geri döndürülemezlerdir. Sıyırılma, yapışmaya nazaran daha uzun periyotlu bir hata türüdür. Erozyon oluşması durumunda ise, kalıp ölçüleri değişikliğe uğradığı için kalıbın yenilenmesi gerekmektedir. Erozyon aşınması, her çarpma ile kalıptan malzemenin ayrılmasıdır. Buna rağmen yapışma, kısa sürede oluşan bir hata türüdür. Yapışma olduğu takdirde kalıpta yapışmış bölge mekanik olarak parlatılır. Bazı durumlarda ise yapışmış bölge kimyasal yollarla temizlenir. Her iki durumda da yapışma, kalıbın temizlenmesi için üretimi durdurmakta ve yapışmış bölge alınmaktadır. Kısaca yapışma, üretim maliyetlerini ve zaman kaybını arttırmakta, prosesi zorlaştırmaktadır [11].

### **2.3.2.1 Erozyon**

Erozyon, kalıp yüzeyi ve sıvı metalin mekanik etkileşiminden kaynaklanan, kalıp yüzeyindeki malzeme kaybıdır. Diğer taraftan erozyon, sıvı metalin hareketi sonucu oluşan sıcak mekanik aşınmanın yüzeydeki formu olarak da tanımlanabilir. Erozyon, sıvı metalin sıcaklığı ve kimyasal bileşimi kadar, sıvı metalin kalıp içine enjekte edildiği zamanki hızına da bağlıdır. Basıncılı dökümde erozyon sıvı metalin partikülleri tarafından oluşturulur. Aşağıda, şekil 2.7’de şematik olarak metal erozyonu görülmektedir [11].



Şekil 2.7. Çelik ve sıvı metal partikülleri arasında oluşan erozyonun şematik gösterimi [11].

Aşağıda, şekil 2.8’de ise erozyon sebebiyle hasara uğramış bir kalıbın fotoğrafı görülmektedir. Görülebileceği gibi kalıp yüzeyi, döküm parçalarının kalitesini bozacak şekilde hasara uğramıştır [12].



Şekil 2.8. Bir basınçlı döküm kalıbının erozyon sonucu hasara uğramış bölgesinin görüntüsü [12].

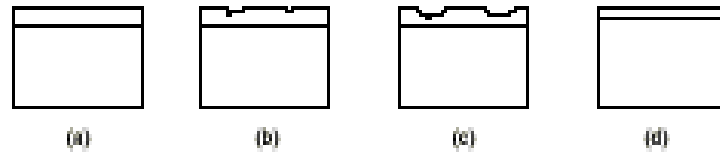
Erozyon mekanizması çeşitli parametrelere bağlı olarak, basınçlı döküm prosesinde daha etkin bir hata mekanizması olmaktadır. Bu parametrelerden bazıları aşağıda incelenmiştir [4].

- Sıvı metal hızının yolluk alanlarında 55 m/s’den büyük olması erozyonun şiddetlenmesine yol açmaktadır. Özellikle kalıba sıvı metalin giriş yaptığı yerlerde (yolluk girişi) erozyon fazlaca görülmektedir.
- Yüksek sıcaklık, kalıbın kolayca geri temperlenmesine yol açtığı için erozyonu etkilemektedir.
- Sıvı metalin içerdiği Si ve Fe bileşikleri (safsızlıklar) ve Al alaşımlarında Si’un %12.7 den fazla bulunması, erozyon riskini arttırmaktadır.

- Kalıp malzemesinin, iyi geri temperlenme dayanımı ve yüksek sıcak mukavemete sahip olması erozyona direnci artırır. Ayrıca kalıbın düzenli ve doğru şekilde yağlanması da erozyonu önleyici etki yapar.

Erozyonun başlarında, kalıp renginde görülen değişme, bu hata türünün bir özelliğidir. Oksit tabakası parçalanınca kalıp yüzeyi parlamaya başlar. Eğer erozyon ağır bir biçimde görülürse yüzey pürüzlülüğü başlar. İlerleyen safhalarda kalıp yüzeyinde çukurcuklar görülmeye başlar. Bu çukurcuklar sıvı metalin atomik partikülleri sebebiyle oluşmaktadırlar [11].

Üretim prosesi esnasında yapılan gözlemler sonucunda erozyonun ilk çevrimlerde hemen oluşmadığı belirlenmiştir. İlk çevrimlerle son çevrimler arasındaki temel fark yüzeyde bir oksit tabakasının varlığıdır. Oksit tabakasının erozyon sebebiyle erimesi aşağıda şekil 2.9’da şematik olarak görülmektedir [11].



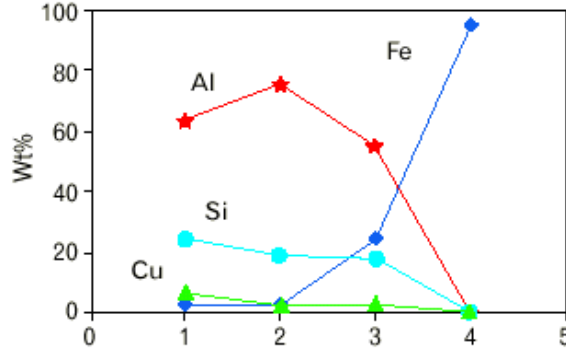
Şekil 2.9. Döküm çevriminde erozyon sebebiyle oksit tabakasının aşamalı olarak erimesi [11].

Şekil 2.9 b’de görüldüğü üzere oksit tabakası çarpan metal partikülleri ile kırılmakta, kırılan bölgeler anot, diğer kırılmayan tabaka ise katot oluşturmaktadır. Küçük anot - büyük katot oluşumu bir potansiyel farkı oluşturarak, açığa çıkan alanın büyümesine sebep olmaktadır. Sonuçta ise şekil 2.9 d’de görüldüğü üzere tüm koruyucu oksit tabakası yok olmaktadır [11].

### 2.3.2.2 Yapışma

Yapışma, sıvı metalin soğuma sırasında kalıp ile kimyasal etkileşimi sonucu kalıp yüzeyine yapışması sebebiyle olmaktadır. Kalıp çeliği, sıvı döküm metali ile karşılaştığında, prosesin gerçekleştirildiği ortam ve şartlara bağlı olarak iki malzeme arasında ara tabakalar oluşmaktadır. Metalografik analizlerde de döküm malzemesi ile çelik arasında intermetalik tabakaların oluştuğu gözlemlenmiş ve bu görüş doğrulanmıştır [11].

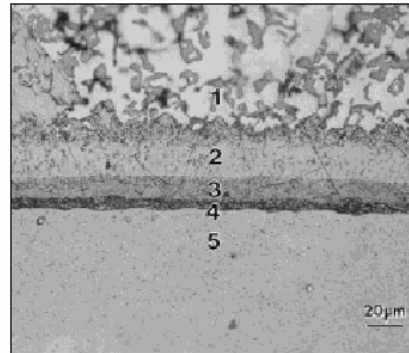
Şekil 2.10'da H13 çeliğinden mamul bir kalıba ait derinlik profili görülmektedir. Al içeriği H13 çelikten yapışmış tabakaya doğru artmaktadır. Demir içeriği de malzemeden yapışmış tabakaya doğru artış göstermektedir. Şeklin x eksenindeki rakamlar şekil 2.11'de görülen, numaralandırılmış bölgeleri simgelemektedirler [11].



Şekil 2.10. H13 çeliğinden imal edilmiş bir kalıbın kullanım sonrası derinlik profili [11].

Yapışma olayını 3 ayrı evrede incelemek olasıdır. Yapışma, oksit tabakasının erozyon etkisi ile ortadan kalkmasıyla başlamaktadır. Erozyon, çeliği sıvı alüminyuma maruz bırakmaktadır. Bunun sonucunda ise yüzeyde, sıvı alüminyum tarafından yaratılan termal korozyon ve difüzyondan kaynaklanan intermetalik bileşikler oluşmaktadır [11].

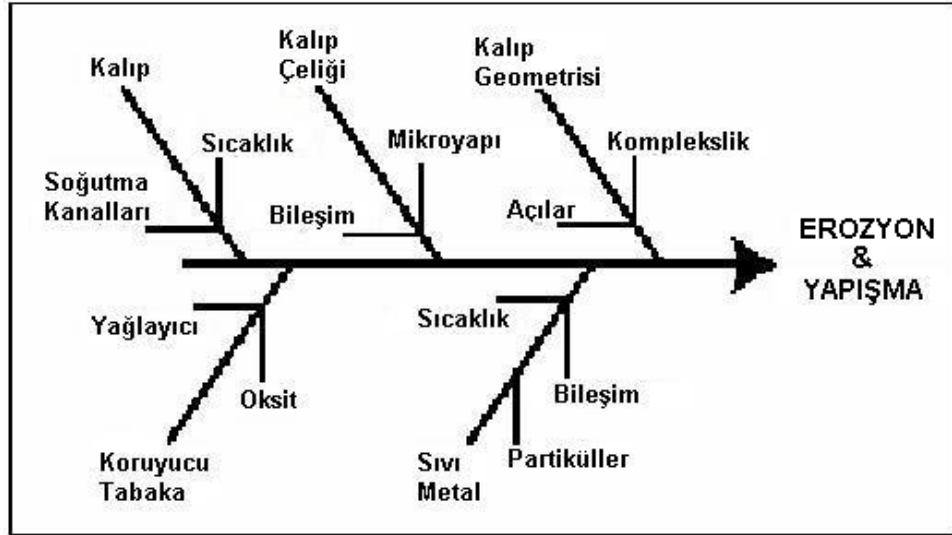
Al-Si alaşımlarının dökümünde ise Fe-Al intermetalik bileşikleri yerine, Fe-Al-Si intermetalik bileşiklerinin oluştuğu gözlemlenmektedir. Şekil 2.11'de H13 çeliği ile sıvı metal arasında oluşan intermetalik bileşiklerin bir görüntüsü verilmiştir. Şekilde, sıvı alüminum alaşımından başlayarak, yukarıdan aşağıya doğru, kalıp malzemesine kadar oluşan fazlar numaralandırılmıştır [11].



Şekil 2.11. H13 çeliği ve sıvı alüminyum alaşımı arasında oluşan intermetalik fazlar. (1- A390, 2-  $Al_4FeSi$ , 3-  $Al_{15}Fe_6Si_5$ , 4-  $Al_{12}Fe_6Si_5$ , 5-H13 taban malzemesi) [11].

### 2.3.2.3 Erozyon ve Yapışmaya Etki Eden Faktörler

Erozyon ve sıyırılma mekanizmasını pek çok faktör etkilemektedir. Genel olarak; yapışma çözünme ve difüzyon, sıyırılma ise proses parametrelerine bağlıdır. Şekil 2.12'deki balık kılçığı diyagramı, prosesi etkileyen faktörleri ve bunlara bağlı alt faktörleri göstermektedir [11].



Şekil 2.12. Yapışma ve sıyırılmaya etki eden parametreler [11].

#### a) Döküm alaşımı

Genel olarak saf alüminyum, Al-Si alaşımlarına nazaran daha az zarar verir. Küçük sert tanecikler oluşturan silisyum elementinin varlığı erozyonu artırırken, Mn elementinde artış erozyonu düşürür. Alaşım bileşimi ve morfolojisi, yapışma ve sıyırılmada önemli bir rol oynar. Demirden daha düşük ergime sıcaklığına sahip elementler, mesela Cu, Mg, Sn, Mn, Zn, yapışma eğilimini azaltabilirler [11].

#### b) Sıvı sıcaklığı ve hız

Sıvı metalin sıcaklığı, arayüzeyde oluşması muhtemel kimyasal reaksiyonların hızını etkilemektedir. Arayüzeydeki intermetalik tabakanın büyümesi, demir ve alüminyum atomlarının difüzyonu ve intermetalik tabakanın sıvı içinde çözünmesinden kaynaklanmaktadır. Sıvı metal ile çelik arasında oluşan konsantrasyon gradyanı da hem alüminyum, hem de demir atomlarının difüzyonunu desteklemektedir. Elementlerin alüminyum içinde çözünabilirliği sıcaklık ile artmaktadır. Çözünme hızı, aynı zamanda sıvı metal hızı ile de artmaktadır. Diğer taraftan, sıcaklığın artışı yapışma mekanizmasının etkinliğini artırırken, sıcaklığın düşük tutulması da “katı

sürtünme””den dolayı sıyrılma mekanizmasını etkin kılar. Her iki mekanizma için de artan sıvı metal hızı, etkinliği arttırmaktadır. Minimum yapışma ve sıyrılma için optimal bir eriyik hızı bulunmalıdır [11].

#### c) Çelik bileşimi

Basınçlı döküm metali bileşimi, kalıpların korozyon dayanımı sözkonusu olduğunda son derece önemli bir konu haline gelmektedir. Sıvı alüminyum içinde elementlerin çözünme hızı, alaşım elementlerinin sıvı içinde bulunma miktarına göre değişmektedir (konsantrasyon gradyanı). Genel bir yaklaşım olarak, korozyon mekanizmasını azaltmak için, elementleri alüminyum içinde düşük çözünürlüğü olan bir kalıp malzemesi kullanmak gerekir. Sıvı alüminyum içinde elementin çözünürlüğünü arttırmak, sıvı alüminyum içinde o elementin çözünme oranını arttırmak demektir [11].

#### d) Kalıp geometrisi, Kalıp sıcaklığı – Soğutma

Karmaşık yapıya sahip kalıpların yapışmayı arttırdığı bilinmektedir. Kalıp yüzeyleri yapışmayı önlemek amacıyla soğutulmaktadırlar. Ayrıca, kalıbın girift bölgelerinde, uygun ısı transferini sağlamak için soğutma sistemleri sağlanabilir. Yolluk girişlerinde yer alan bölgeler ise erozyona daha çok maruz kalmaktadırlar. Yağlama da, soğutma da kalıp performansı açısından çok önemli bir rol oynamaktadırlar. Soğutucunun püskürtülme açısı, püskürtme sıcaklığı, püskürtme süresi yağlamanın etkisini belirleyen parametreler arasındadırlar [11].

#### e) Koruyucu tabaka – Oksit tabakası

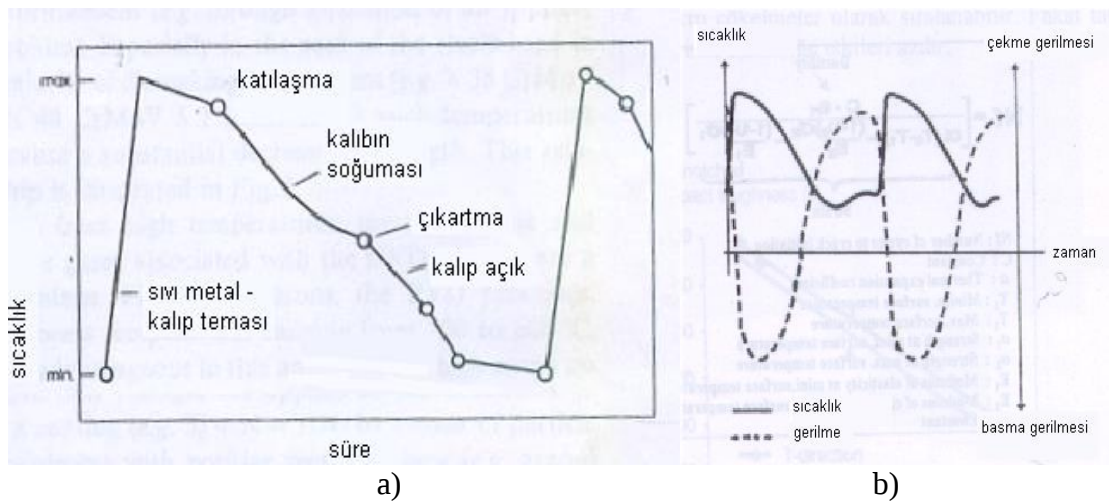
Bir oksit tabakası veya yağlayıcı tabaka ile yapışma ve erozyonun önüne geçilmesi endüstride önemi kanıtlanmış uygulamalardandır. Kalıp yüzeyinin yağlanması, her döküm sonrası enjeksiyonu kolaylaştırmak ve yapışmayı önlemek için yapılmaktadır. Genel yaklaşım kalıp yüzeyinin yağlanması ile yüzey ısısının düştüğü ve yapışmayı önlediği yönündedir. Sıvı alüminyum ve kalıp metali birleştikleri zaman yapışma olayı görüldüğü halde, bu iki yüzey arasında organik, katı bir film olduğu zaman yapışma görülmemektedir. Kalıp yüzeyini kaplayan oksit tabakası, kalıp yüzeyini dış etkilere koruyarak pasif bir bariyer görevi görmektedir. Buhar yardımı ile oluşturulan oksit tabakası, bu konuda en etkin olan tabaka türüdür. Bu tip oksit tabakası, su bazlı yağlayıcı uygulandığı ve hava püskürtüldüğünde oksitlenme

sonucu oluşur. Buhar fazı ile oluşturulan oksit tabakası, fazlaca oksijen içerdiği için daha kalın ve koruyucudur [11].

### 2.3.3 Termal Yorulma

Basınçlı döküm kalıpları sürekli olarak ısınma ve soğuma ile karşılaşmaktadırlar. Bu ısıl çevrim, ergimiş alüminyumun kalıp ile temas ettiği yüzeylerde, termal yorulma olarak adlandırılan, kalıbın yüzeyinde kılcal çatlaklarla başlayan ve zaman içinde kalıbın tamamen hasara uğramasına neden olabilecek bir hataya başlangıç oluşturur. Malzemenin genleşme ve daralmasına izin vermeden, sürekli ısıtılması ve soğutulmasından sonra oluşan çatlaklar ve bunun sonucunda kırılma termal yorulmaya bağlanır [7].

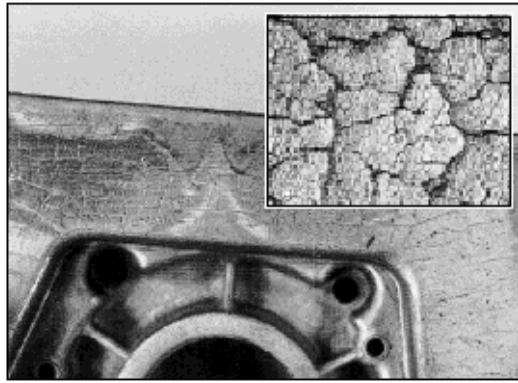
Basınçlı dökümde termal yorulma en önemli hasar mekanizmalarından biridir. Şekil 2.13'te, her dolumda kalıbın maruz kaldığı termal çevrimden kaynaklanan ısıl gerilmeler görülmektedir. Kalıp yüzeyindeki sıcaklık değişimi, ergimiş alüminyum ile temas (750 °C) ve yağlayıcı sıvının püskürtülmesi (20 °C) ile oluşmaktadır. Malzeme üzerinde oluşan bu gerilmeler, kalıp ömründe son derece belirleyici bir rol oynamaktadırlar. Bu gerilmeler sonucu oluşan ısıl çatlaklar, genelde keskin kenarlarda veya geçiş bölgelerinde oluşurlar ve yüzey görünümünde belirgin olumsuzluklar sergileyen büyük çatlaklar oluşana kadar yayılırlar. Bazı durumlarda, bu çatlakların oluşması sonucunda, dökülen parçaların kalıptan çıkarılması imkansızlaşabilir [13].



Şekil 2.13. Basınçlı döküm prosesinde a) termal çevrim döngüsü [13] ve b) oluşan gerilmeler [14].

Termal çatlaklar, görünümlerine göre sıcak yorulma (ısıl çatlaklar) ve gerilme çatlakları (büyük çatlaklar) diye sınıflandırabilirler. Isıl çatlaklar, üst yüzey tabakada görülen net şekilli çatlaklardır. Gerilme çatlakları ise, genelde, kalıp konfigürasyonuna bağlı olarak, gerilim dağılımının sonucu olarak görülürler [3].

Genellikle termal yorulma çatlakları, birkaç bin çevrimden sonra veya düşük çevrimli yorulma rejimlerinde ortaya çıkmaktadırlar. Çatlak derinliği ve açıklığı şekil 2.14. de görülmektedir. Bunun dışında, büyük çatlaklar, termal şok veya mekanik yüklemeye bağlı olarak, kalıp hasarlarında başı çekmektedirler [3].



Şekil 2.14. Sıcak yorulma çatlağı fotoğrafı [12].

#### 2.3.3.1 Sıcak Yorulma Çatlakları (Isıl Çatlaklar)

Metal enjeksiyonda en belirgin hasar mekanizması termal yorulmadır ve kalıpların bir çoğunun ömrünün esas belirleyeni olarak göze çarpmaktadır. Şekil 2.14'te de görüldüğü gibi bu çatlaklar, kalıp girintilerinde yavaş yavaş oluşan ince çatlaklar topluluğu sonucunda oluşan ısıl çatlamlardır [15].

Kalıbın tekrar eden ısıtma ve soğutma rejimi, yüzey ile kalıp içerisindeki sıcaklık farklılıklarına bağlı, yüzey bozunmalarına sebep olan ısısal döngülere neden olur. Sıcaklık değişimi kalıptan kalıba, kalıp döküm metaline, kalıp boyutlarına, kalıp geometrisine ve döküm parametrelerine bağlı olarak değişir. Isıl döngüler yüzeyde ısıl gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Şekil 2.13'te etkin olan gerilmeler ve bunların etkin olduğu sıcaklıklar görülmektedir. Çevrim sırasında kalıp çekirdeğinin etrafındaki kısım sıcaklıktan etkilenmediği için genleşmez. Döküm alaşımının her enjeksiyonunda ise kalıp çekirdeği genleşmeye çalışır, fakat genleşemez ve bu durum basma gerilmeleri oluşturur [15].

Kalıp yüzeyinin sıcaklığı, kalıbın ön ısıtılması ve metalin taşıdığı ısının toplamından oluşmaktadır. Bu nedenle kalıbın ön ısıtılması ve enjeksiyon devam ettiği sürece de kontrollü olarak soğutulması çok önemlidir. Kalıp ısıtmanın uygun yöntemle ve homojen olarak yapılması, gerek kalıp ömrünün uzatılması, gerekse soğutma ile termal yorulma olayının kontrol altına alınması açısından gereklidir. Ön ısıtma sıcaklığı alüminyumun basınçlı dökümünde en az 180° C olmalıdır [7].

Kalıbın yüzey sıcaklığı ısı yorulma sırasında çok önemlidir. 600°C'ye kadar ısı genleşme ve gerilmeler normal sıcak iş çelikleri için normal kabul edilirken, daha yüksek sıcaklıklarda ısı yorulma riski artar. Kalıp yüzeyinin sıcaklığı genelde, ön ısıtma, döküm metal sıcaklığı, döküm ürün tasarımı, kalıp şekli ve kalıbın termal özelliklerine bağlıdır [7].

Döküm sırasında kalıbı en yüksek sıcaklıkta uzun zaman tutma, yani “overtempering” de sünme riskini artırır. Bu da mekanik ve termal yüklemelere daha az dayanım demektir [7].

Hızlı soğutma ise daha büyük gerilmelere ve çatlakların beklenenden önce başlamasına yol açar. Dolayısıyla kalıp ömrünün düşmesi kaçınılmazdır [7].

Genel olarak yüksek termal yorulmaya dayanıklı malzemeler; düşük termal genleşme katsayısı, düşük poisson oranı ve yüksek elastik modüle sahip olmalıdırlar. Oksidasyon direnci ve basma dayanımı da termal yorulma direncinin artmasına yardımcı olurlar. Uzun kalıp ömrü elde edebilmek için, malzemenin mümkün olduğu kadar sünek olması, iyi bir tavlama direncine, iyi bir ısı iletkenliğe, yüksek sıcak akma mukavemetine ve düşük termal genleşmeye sahip olması gerekmektedir [14].

Bir kalıp malzemesinin sıcak yorulma çatlaklarına direnç potansiyelini arttırmanın yolları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Plastik deformasyon direnci, yüksek akma mukavemeti ve yüksek temperleme direnci ile arttırılabilir.
- Tipik baskı çevrimi sırasında genleşme ve çekmenin en aza indirilebilir (Bunun için yüksek ısı iletkenliğe ve düşük ısı genleşme katsayısına sahip malzeme kullanılmalıdır).
- Çatlamanın gerilmeyi emmesi için malzeme yüksek sünekliğe sahip olmalıdır.

Kalıp malzemesinin, sıcak akma mukavemeti, temperleme direnci, ısı iletkenlik, ısı ıenleşme, süneklik ve tokluğu gibi özellikleri büyük oranda bileşimine bağıldır. Çeliğın üretim prosesi de yüksek seviyede süneklik ve tokluk açısından önem taşımaktadır. Metal dışı inklüzyonlar, birincil karbürler, iri ikincil karbürlerin ağı veya damar oluşturmaı ve segragasyonu azaltılmaya çalışılmalıdır [16].

### **2.3.4 Büyük Çatlaklar**

Büyük çatlaklar sonucunda, kalıplar çalışma süresinden bağımsız olarak aniden kırılmaktadırlar. Büyük çatlaklar gerilme şartları altında, kalıp yüzeyinde gerilme konsantrasyonlarında, gevrek çatlamanın kararsız gelişmesini içerirler. Büyük çatlakların temel nedeni, döküm işlemleri sırasında aşırı termal ve mekanik yüklenmelerdir [16].

Bir kalıp malzemesinin büyük çatlaklara iyi direnç gösterebilmesi için yüksek seviyede tokluğa sahip olması gerekmektedir. Büyük çatlaklara direncin artırılmasının bir yolu da düşük çalışma sertliğidir. Bununla beraber, yüksek akma mukavemeti ısı çatlaklara, çökme ve aşınmaya direnç açısından faydalıdır. Belirgin yoğunlaşma, birincil kalıp çeliğinin geliştirilmesi, geliştirilmiş kalıp çeliğı özellikleri ile mikro yapısal tokluğun arttırılması üzerinedir. Yüksek seviyede mikro yapısal tokluğun elde edilmesi çok kritik bir işlemdir; bu da ısı işlem prosesi ile sağlanabilir. Büyük tane boyutu, tane sınırlarında karbür çökmesi, perlit oluşumu ve beynit oluşumu, tokluk ile ilgili en zararlı ısı işlem ürünleridir. Değinildiğı üzere, kalıp çeliğinin termal yorulma çatlakları ve büyük çatlaklara direncini arttırmada ısı işlem çok kritiktir. Kalıp performansını optimize etmek için, ısı işlemde sertleştirme sıcaklığı, tutma süresi ve en önemlisi su verme hızı dikkatli seçilmelidir [16].

### **2.4 Kalıp Ömrünü Arttırmanın Yolları**

Kalıpların bakımı; dökümün yüzey kalitesi veya ölçülerinin fazla önemli olmadığı durumlarda kaynak veya zımpara ile yapılabilir. Fakat bilindiğı gibi kalıp maliyeti, basınçlı dökümün üretim maliyetleri içerisinde çok büyük bir bölümü kapsadığından, döküm ömrünü optimize etmek için pek çok yaklaşım önerilebilir. Genelde döküm ömrü; döküm tasarımındaki geometrik faktörlere (gerilmeler ve ısısal ölçü değişiklikleri), döküm malzemesi özelliklerine (işlenebilirliği, ısı işlemi, tokluğu, aşınma ve sıcak yorulma dirençleri), proses şartlarına (ön ısıtma, ısıtma - soğutma

çevrimleri, pres kapama kuvveti, yağlayıcılar, servis süreleri,vs.) ve kalıp yüzeyi özelliklerine bağlıdır [3].

Uygun yüzey işlemler ile kalıp ve takım ömrü ve performansı artırılabilir. Termomekanik işlemler ve elektrokimyasal yöntemlerle biriktirilmiş kaplamaların yanında, sert seramik ince film kaplamalar da çelik yüzeyini döküm alaşımının kimyasal etkisine karşı koruyabilmekte ve termal çatlakların oluşumunu ve yayılmasını önlemektedirler [17].

Nitrüleme gibi yüzey işlemleri, basınçlı döküm kalıplarına aşınma direncini ve sıcak yorulma direncini arttırmak için uygulanmaktadır [3].

Son yıllarda ise, yeni bir gelişme olan sert seramik kaplamaların uygulanması yaygınlaşmaktadır. Nitrür ve karbür esaslı sert seramik kaplamalar, kalıp çeliğini döküm metalinin yapışması, erozyonu ve korozyonundan korumakta ve kalıbın ısısal çatlama karşı direncini arttırmaktadırlar. FBB yöntemi ile yapılan kaplamalar ile sağlanan yararlar şöyle sıralanabilir: takım ömrünün artması, kalıptan parça alınırken kalıba daha az zarar verilmesi, kalıbın daha az sıklıkta temizlenmesi ve kalıp yağlayıcılarının daha az kullanılması. Ayrıca geleneksel kaplama yöntemlerinde kullanılan proseslere kıyasla FBB kaplama prosesleri daha çevreci ve temiz proseslerdir [18]

## **2.5 Kaplama Teknikleri**

Günümüzde pek çok çeşitli sert seramik kaplama yöntemi kullanılmakta ise de piyasada başlıca iki değişik kaplama yöntemi

- Fiziksel buhar biriktirme (FBB) ve
- Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PDKBB)

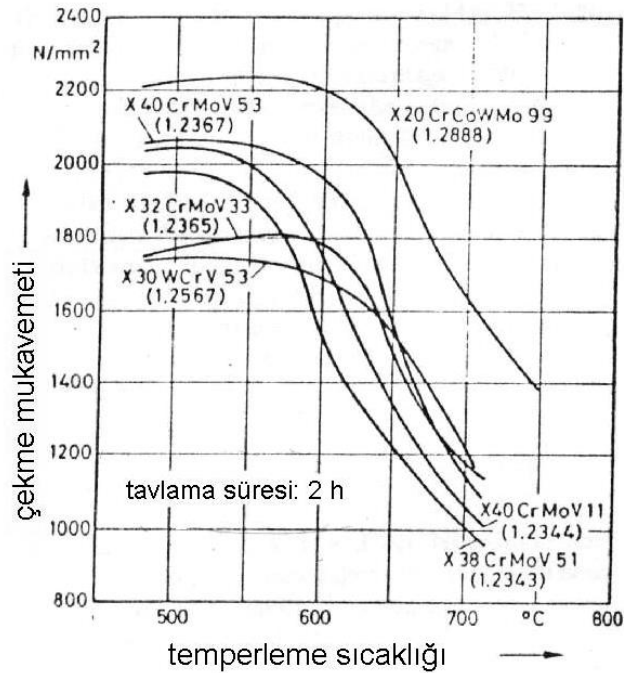
rekabet halindedir [3].

### **2.5.1 Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB)**

Temel prensibi, kaplanmak istenen metalin buharlaşabilen bir bileşiğinin, vakum altındaki bir hazne içerisine taşıyıcı bir asal gaz veya reaktif gaz aracılığı ile gönderilmesi ve önceden ısıtılan taban malzeme üzerinde, kimyasal reaksiyon sonucu metalik veya bileşik olarak kaplanmasıdır [19].

Bu uygulamanın avantajları, kaplamanın taban malzemeye çok iyi yapışması, kaplanacak malzemenin şeklinden bağımsız olarak her yerde homojen bir kaplama kalınlığının elde edilebilmesi ve aşınmaya dayanıklı kaplama türleri olarak, hemen hemen tüm geçiş elementlerinin borürlerinin, karbürlerinin, nitrürlerinin, oksitlerinin, karbonitrürlerinin, oksit karbürlerinin kaplanabilmesidir [19].

KBB tekniğinin en büyük dezavantajı, istenilen nitelikteki kaplamanın oluşturulabilmesi için taban malzemenin 800-1000°C gibi yüksek sıcaklıklara ısıtılması zorunluluğudur. Bu durum da üzerine kaplama yapılabilecek malzemeler açısından sınırlamalar getirmektedir. Alüminyum basınçlı döküm uygulamalarında, kalıp üretiminde kullanılan sıcak iş takım çelikleri (1. 2344 ve 1. 2367) dikkate alındığında, KBB uygulamasında söz konusu olan kaplama sıcaklığının 900°-1200° C olması, ısıtma işlemi gerektiren çelikler olduğu için uygun değildir [5].



Şekil 2.15. Temperleme sıcaklığı ile çeşitli çeliklerin çekme dayanımı değişimi. [13]

Örneğin, kullanım alanı açısından, yüksek hız çelikleri üzerine bu yöntemle kaplama yapılamaz [19]. Taban malzemeye bağlı olarak tokluğu ve sertliği düşürebildikleri gibi çarpılmaya ve gevreklemeye de yol açabilirler [17]. Özellikle kalıp yapımında kullanılan çelik uygulamalarında, KBB tekniğinde kullanılan sıcaklıklar temperleme sıcaklıklarının üzerinde olduklarından, bu gibi yüksek sıcaklıklar mikroyapıda ve ölçülerde değişikliklere yolaçabilirler. Şekil 2.15'te taban malzemenin çekme dayanımı ile temperleme sıcaklığı arasındaki ilişki görülmektedir [13].

Yüksek sıcaklıkların yanı sıra, KBB tekniğinde kullanılan buhar fazındaki metal bileşiklerin veya reaksiyon ürünlerinin birçoğunun korozif, zehirleyici ve/veya yanıcı olması dezavantaj yaratmaktadır. KBB tekniğinde kullanılan metal buharını taşıyan bileşiklerin korozif olması ve bu bileşiklerin kaplama içine entegre olması, KBB tekniği ile üretilen kaplamaların korozyon direncinin daha düşük olması sonucunu yaratmaktadır [5].

KBB işleminin daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmesine olanak tanımak amacı ile bu tekniğin “plazma destekli” türleri geliştirilmiştir. Genellikle inert bir gaz kullanılarak vakum altında bir plazma oluşturulması, ortamın değişmesi sonucunda işlemi kolaylaştırmaktadır [19].

### **2.5.2 Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB)**

FBB teknikleri, katı bir kaynağın vakum altında buharlaştırılması veya atomal hale dönüştürülmesi ve taban malzeme üzerine biriktirilmesi ile gerçekleştirilir. FBB tekniğinin temel adımları şöyle sıralanabilir [20]:

- Kaplama malzemesinden vakum altında buharlaşma veya süblimasyon ile buhar fazının oluşturulması
- Oluşan taneciklerin gaz fazı içerisinde kaynaktan kaplanacak malzeme taşınması
- Filmi oluşturacak malzem taneciklerinin kaplanacak malzeme üzerinde yoğunlaşması difüzyon ile katman oluşumu.

FBB teknikleri kullanılarak, KBB tekniğinden farklı olarak, çok daha düşük sıcaklıklarda (200-600 °C) seramik kaplamaların yapılabilmesi mümkündür. Bu nedenle yüksek hız çeliğinden imal edilen takımların ve ısıl işlem görmüş kalıp yüzeylerinin kaplanmasında FBB teknikleri kullanılmaktadır. Ayrıca bu tip kaplamalar kalıpları zarara uğratacak hiçbir korozif gaz içermemekte, çevreye zarar vermemektedirler [13].

FBB tekniklerinde, 500 °C altındaki kaplama sıcaklıklarında dahi, yüzeye çok iyi yapışan yoğun kaplamalar elde etmek mümkün olmaktadır. Bu kaplama koşullarında termal gerilmeler ve sıcak çekilmeler azalmaktadır. Bununla birlikte, FBB yönteminde sorun, karmaşık geometriye sahip parçalarda üniform bir kaplama yapılması noktasında ortaya çıkmaktadır [5].

FBB teknikleri, yüksek güç elektrik ve elektroniğinde gerçekleştirilen gelişmeler ve bunlara dayanılarak üretilen güç ve kontrol ünitelerinin vakum teknolojileri ve kaplama sistemlerinde kullanılmalarına paralel olarak gelişmiş ve yaygınlaşmışlardır. En önemli teknolojik gelişme olarak plazma destekli (iyon kaplama) ve reaktif kaplama tekniklerinin geliştirilmesi gösterilebilir. Plazma destekli FBB tekniklerinin gelişimi ile sağlanan özellikler arasında şunlar sayılabilir [20]:

- Kaplanacak parçaların ısıtma sırasında sıçratma mekanizması ile temizlenmesi
- Kaplanacak malzemenin kaplanacak yüzeye difüzyonu
- Daha yoğun kaplama yapısı
- Düşük sıcaklıklarda bile iyi bir kaplama yapısı ve buna bağlı olarak gelişen özellikler
- Parçaların ilave bir ısıtıcı kaynak ile ısıtılmasına gerek duyulmaması
- Yüksek biriktirme hızları

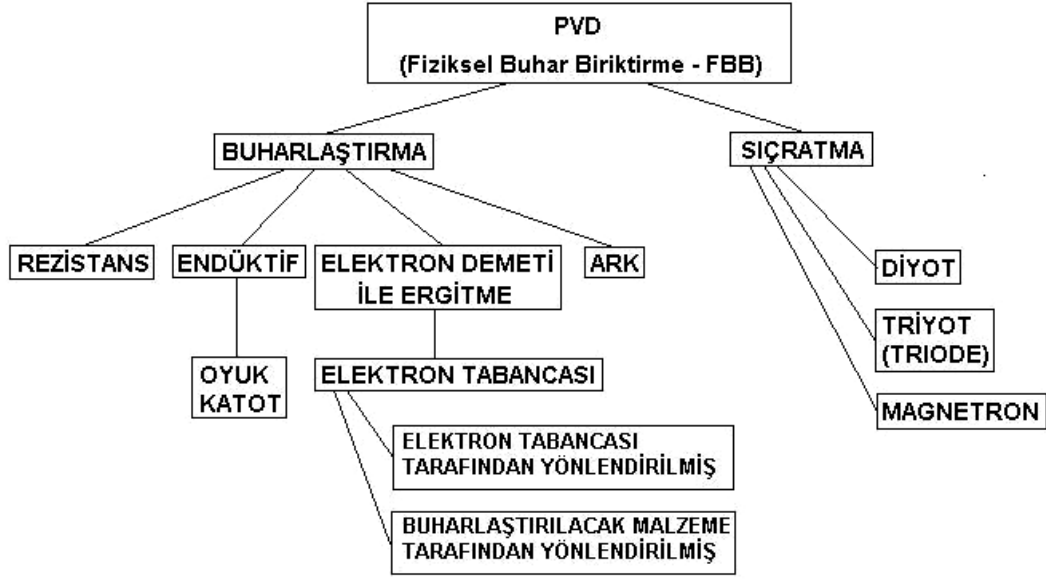
Bu özellikler sayesinde aşınma ve sürtünme uygulamaları için elverişli özelliklere sahip (yüzeye çok iyi yapışan, yüksek sertlikte, yoğun) seramik kaplamalar üretilmektedir [19].

FBB teknikleri kullanılarak seramik nitelikli, sert, aşınmaya dayanıklı, nitrürler (TiN, CrN, ZrN, TiAlN,...), karbonitrürler (TiCN,...), oksitler ( $Al_2O_3$ ,...), borürler (ZrB,  $TiB_2$ ,...), karbürler (TiC,...), elmas benzeri karbon kaplamalar, sürtünme özelliğini geliştirmeye yönelik  $MoS_2$  ve hidrojenli elmas benzeri karbon kaplamalar üretilmektedir [19].

FBB teknikleri buharlaştırma ve sıçratmaya dayalı olmak üzere 2 temel grup altında toplanabilir. Şekil 2.16.'da FBB tekniklerinin sınıflandırılması görülmektedir [19].

Metalurjik amaçlı seramik kaplamaların teknolojik olarak üretilmesinde yaygın olarak kullanılan üç FBB tekniği vardır [19]:

- 1 – Elektron Demeti ile Ergitmeye Dayalı Teknikler
- 2 – Sıçratmaya Dayalı Teknikler
- 3 - Ark FBB



Şekil 2.16. FBB tekniklerinin genel olarak sınıflandırılması [19].

#### 2.5.2.1 Elektron Demeti ile Ergitmeye Dayalı Teknikler

Elektron demeti kullanılarak kaplanacak malzemeyi vakum ortamında ertitip buharlaştırmaya dayanır. En büyük avantajı, kaplanacak malzemenin ergime sıcaklığı ne olursa olsun ertitilip buharlaştırılabilme yeteneğine sahip olmasıdır [19].

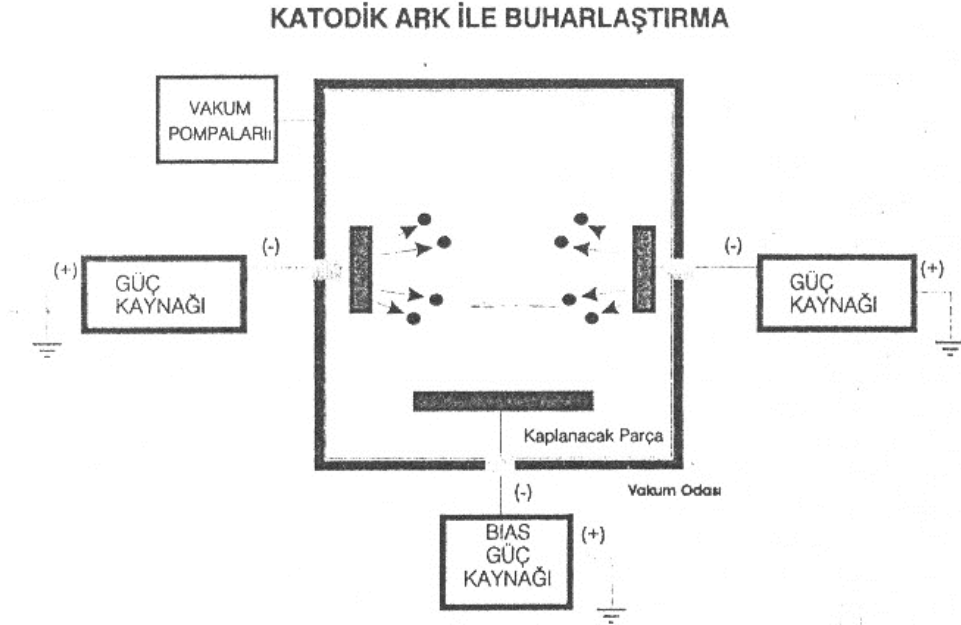
#### 2.5.2.2 Sıçratmaya (Sputtering) Dayalı Teknikler

Sıçratma, katı maddenin yüzeyinin yüksek enerjili iyonlarla bombardımanı sonucu meydana gelen momentum transferi aracılığı ile atomların yüzeyden sıçratılması esasına dayanır. Sıçratma amacı ile asal gaz (genellikle argon), iyonları kullanılır. Ortama asal gaz yanında, reaktif gazların da (azot, oksijen, asetilen) verilmesi ile bu uygulamalar reaktif sıçratma tekniği olarak da kullanılmaktadır [19].

#### 2.5.2.3 Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniği

Malzemenin, vakum altında ark etkisi ile buharlaştırılması esasına dayanır. Bu tekniğin en önemli avantajı, ark etkisi altında buharlaşan malzemenin, oluşan elektriksel alan içerisinde hemen, yüksek oranda ve yüksek enerjili olarak iyonlaşmasıdır [19]. Kaplanmak istenen malzemeye uygulanan negatif voltaj (bias voltajı), şarjlı partiküllerin hızla kaplanacak yüzeye çarparak, orada sıkı, tabana iyi yapışmış bir katman oluşturmalarını sağlar [1]. Ark FBB tekniğinin diğer bir avantajı ise, kaplanacak malzemenin yüksek enerjili metal iyonları ile bombardımanı sonucu

yüzeyin çok iyi temizlenmesi, arayüzeyde de çok ince de olsa bir yayınma katmanının meydana gelmesidir. Bu durum da, sonradan yapılacak sert seramik kaplamaların yüzeye çok iyi yapışmasını sağlamaktadır [19].



Şekil 2.17. Çift katotlu bir ark FBB sisteminin şematik görünümü [19].

Ark FBB yöntemi ile yüzeye iyi yapışan, yoğun yapıda kaplamalar elde etmek mümkündür. Bu kaplama koşullarında termal gerilmeler ve sıcak çekilmeler azalmaktadır. Şekil 2.17’de ark FBB tekniği kullanan bir cihazın temel şematik yapısı görülmektedir [19].

Temel bir katodik ark sistemi: vakum odası, kaynak olarak kullanılacak katot malzemesi, bir ark güç kaynağı, alt metale uygulanacak bias güç kaynağı ve bir anot içermektedir [21].

Vakum ark, ark devresinde katot olarak davranan kaynak malzemesini buharlaştırmak için kullanılır. Ark buharlaştırma ile biriktirme diğer PVD tekniklerinde olduğu gibi vakuma alma, ısıtma ve dağlama, kaplama ve soğutma kademelerini içermektedir. Biriktirme başlamadan önce kaplanacak parçalar kaplama kalitesini olumsuz etkileyecek kirleri gidermek amacı ile temizleme işlemine tabi tutulurlar. Isıtma işlemi, altmetal sıcaklığını belirli bir değere yükseltmek, kaplanacak yüzey üzerindeki organik maddeleri ve oksit tabakalarını uzaklaştırmak amacı ile uygulanmaktadır [22].

Katot malzemesinin yakınına yerleştirilmiş elektroda yüksek voltaj uygulanmasıyla ark buharlaştırma başlatılır. Katot yüzeyinde yüksek hızlarda rastgele hareket eden katodik ark spotlarının sonucu olarak buharlaşma oluşur. Bir ark spotu tipik olarak 1-3 µm çapındadır ve yaklaşık 10 A/µm<sup>2</sup> akım yoğunluğu taşır. Bu yüksek akım yoğunluğu kaynak malzemesi katodun ani buharlaşmasına neden olur. Katot malzeme metal, yarı iletken veya yalıtkan olabilir. Buharlaşan malzeme negatif bias voltajı uygulanan taban metal yüzeyine doğru harekete geçer ve taban metal üzerinde yoğunlaşır. Plazma içine hareket eden iyonların enerjileri 40-100 eV arasındadır. Bunun sonucunda çok yüksek biriktirme hızlarına ulaşılmaktadır [21].

Tekniğin dezavantajı ise, katodik ark yönteminin ürettiği kaplamaların çok sayıda “droplet” içermesidir. Ark buharlaştırma sırasında ark spotunun kaynak malzemesini ani olarak ısıtması sonucunda katottan elektronlar, metal iyonları ve nötral buhar atomlarının yanısıra sıvı halde metal damlacıkları (dropletler) da sıçrayarak plazmayı oluşturmaktadır. Bu sıvı damlacıklar kaplama kalitesini birçok açıdan olumsuz etkilemektedirler. Kaplanacak yüzeye yapışarak kaplama kalitesi için önemli bir faktör olan yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadırlar [19].

## **2.6 Sert Seramik Kaplama Uygulamasının Sağladığı Faydalar**

Kalıpların işletme giderlerindeki önemli yeri bundan önceki bölümlerde de etraflıca anlatılmıştır. Kullanılan kalıpları yenileri ile değiştirmek yerine, kalıbın yüzey özelliklerini geliştirmek ve bu sayede ömürlerini arttırmak, bu soruna ekonomik ve pratik bir yaklaşımdır. Bu sebeple kalıpların performanslarını arttırmak için, aşınmaya ve korozyona dayanıklı sert seramik kaplamaların kullanımı önerilmektedir. Bu tür kaplamalar genellikle kalıp malzemesinden çok daha yüksek sertliklere sahip olup, ısıl yorulmalara ve difüzyona karşı son derece yüksek direnci olan, çok iyi kimyasal kararlılığa sahip malzemelerdir [23].

Bunların yanısıra, basınçlı döküm kalıplarının ömürlerinin arttırılması, kaplamanın başarılı yüzey topografisi optimisasyonuna, iyi yapışma göstermesine, oksidasyon dayanımına ve düşük basma gerilmelerine sahip olmasına bağlıdır [9].

Son yıllarda sert seramik film kaplamaların kullanımı ile ilgili büyük aşamalar sağlanmıştır. Bu teknolojilerde kullanılan nitrür, karbür, oksit, vb. sert seramik kaplamaların aşınmaya, kalıp çeliklerine nazaran, daha dayanıklı oldukları uzun

zamandır bilinmektedir. Bununla birlikte, bu malzemelerin gevrek ve çok kırılgan bir yapıda olmaları, bütün bir kalıp malzemesi olarak kullanımlarını engellemektedir. Ayrıca fiyatları da oldukça yüksektir. Ancak bu malzemeler sert seramik film olarak çelikler üzerine kaplandıklarında, yüzey sertliği çok yüksek, kütsel olarak tokluğu yeterli kalıpların üretilmesi mümkün olmaktadır. Sert seramik kaplamaların takım ve kalıp yüzeylerine başarı ile biriktirilebildiği en önemli yöntemlerden birisi de FBB tekniğidir. FBB tekniği ile biriktirilen sert seramik kaplamalar, koruyucu ince film kaplama olarak geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Üzerine kaplandıkları taban malzemesinin aşınma dayanımı, korozyon dayanımı, dekoratif ve difüzyon bariyeri özelliklerini geliştirmektedirler.

Sert seramik ince filmlerin üretim yöntemlerinin en önemlilerinden biri olan FBB sistemlerinin diğr bir avantajı da, galvanik kaplamalara kıyasla, temiz prosesler olmalarıdır [19].

Genel olarak talaşlı imalat takımlarında TiN ve TiAlN kaplamalar, şekil verme ve döküm kalıplarında ise CrN kaplamalar iyi sonuç vermektedirler. Cr bazlı kaplamalar daha çok metal şekillendirme ve endustride aşınma ve korozyon koruyuculuğu gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar [9].

Sert seramik kaplamaların kullanımına örnek olarak alüminyum basınçlı döküm kalıpları gösterilebilir. Al'nin demir içinde özellikle 500°C'nin üzerinde, demirin de sıvı Al içindeki yüksek çözünürlüğü ve intermetalik bileşiklerin kolay oluşabilirliğinden dolayı, alüminyum ve alaşımları ile çelik kolay reaksiyon vermektedir. Uygulanacak iyi bir yüzey işlem, kompakt ve iyi yapışmış bir kaplama, bu proseste çeliği alüminyumdan koruma adına iyi bir çözüm olabilir [13].

Basınçlı döküm uygulamasında kalıp yüzeyine uygulanacak sert seramik kaplama tabakasının, basınçlı döküm sürecinde karşılaşacağı koşullara karşı koyabilmek için sahip olması gereken özellikler şöyle sıralanabilir [1]:

- Yüksek aşınma dayanımı,
- Taban malzemesi ile kaplama tabakasının birbirine iyi yapışması,
- Kalıp çeliğine uyumlu bir termal genleşme katsayısı,
- Yüksek ısı iletkenlik,
- Al karşısında düşük adhezyon eğilimi,

- Al eriyiğine karşı yüksek korozyon direnci,
- Kaplama kalınlığı,
- Kalıp yüzey özellikleri, yüzey pürüzlülüğü.

## 2.7 Krom Nitrür (CrN) İnce Film Kaplamalar

Cr-N kaplama sistemleri son 10 yıldır araştırılmaktadırlar. Uygun yöntemlerle biriktirilen CrN kaplamalar, üstün korozyon ve aşınma özellikleri göstermektedirler. İlk başarılı uygulamalar sonunda CrN kaplamaların TiN, TiCN, TiAlN, vb. kaplamalar arasında önemli bir yer işgal edebileceği görülmüştür [18].

Günümüzde kullanılan CrN kaplamalar; metal şekillendirme takımlarında ve kalıplarda, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik ve düşük kalıntı gerilimi sağlayarak aşınma dayanımlarını arttırmaktadırlar. [18]

Genelde, CrN kaplamalar düşük derecede iç gerilme içermeleri ve uygun tane yapıları sayesinde, nazaran kalın PVD katmanlarının biriktirilmesine de olanak tanımaktadırlar. CrN ince film kaplamaların çelik malzemelere iyi yapışma, korozyon ve oksidasyon dayanımları gibi özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla önerilen bir sistem de, ara bir tabaka olarak 0.1-0.5  $\mu\text{m}$  kalınlıkta Cr katmanının biriktirilmesidir. Bu teknoloji Cr + CrN kaplama olarak ayrı bir konudur. [18]

### 2.7.1 CrN Kaplamaların Özellikleri

Taban malzeme üzerine sert seramik ince film olarak biriktirilen CrN tabakaların, kullanım esnasında performanslarını etkileyebilecek bazı parametreler aşağıda incelenmiştir.

#### 2.7.1.1 Yüzey Pürüzlülüğü

H13 çeliği üzerine, kaplama öncesi değişik yüzey hazırlama işlemleri uygulayarak, taban malzemesi pürüzlülüğünü değiştirmek ve çeşitli kalınlıklarda CrN kaplamalar yapmak suretiyle yapılan denemelerde, numuneler sıvı alüminyuma daldırarak teste tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre, daha iyi yüzey işlem uygulanmış ve yüzey pürüzlülüğü düşürülmüş taban malzemeler üzerine, daha kalın olarak biriktirilen katmanlar (genelde 4-5  $\mu\text{m}$ ), sıvı alüminyumda korozyona daha dayanıklıdır. Pürüzlü yüzeylere uygulanan kaplama yapıları daha yüksek hata

oranları göstermektedir ve korozyon bu hata noktalarından başlamaktadır. Genelde CrN kaplamaların varlığı taban malzemenin sıvı metal ile direk olarak temasını engellemektedir. Fakat kaplama yapısında iğne deliği (pinhole) tabir edilen mikro deliklerin varlığı sıvı alüminyumun çelik ile temasına sebep olmaktadır. Öncelikle kaplama yapısında, bir çatlak oluşmakta ve bu şişme kaplama yapısını çatlatmakta, nihayetinde ise kaplamanın taban malzemeden ayrılmasına sebep olmaktadır. Bu tür kopmalar ise daha büyük bir çelik yüzeyini alüminyumla temasa maruz bırakmaktadır [24].

#### **2.7.1.2 Korozyon Davranışı**

CrN birçok ortamda iyi bir kimyasal kararlılık sergilemesine rağmen, film yapısındaki iğne deliklerinden penetre olan sıvı metal taban malzeme ile etkileşime girebilmektedir. Yüzeyi pürüzlü CrN numunelerinde, kolonsal yapının büyümesi sonucunda, film yapısında iğne deliklerinin oluşması, yüzeyi pürüzsüz numunelere nazaran daha kolay ve daha sık görülen bir durumdur. Dolayısıyla, yüzeyi pürüzsüz taban malzemelere uygulanan ince film kaplamalar daha iyi bir korozyon dayanımı sağlamaktadırlar. [25]

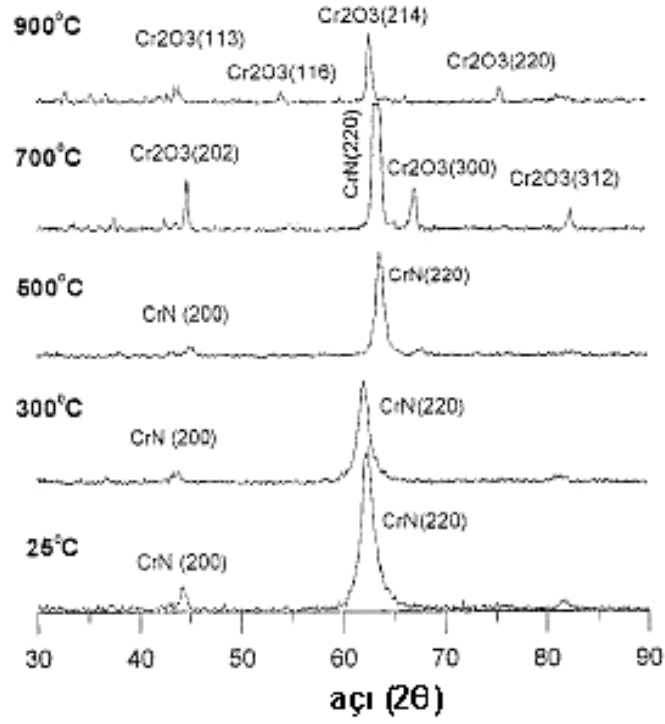
#### **2.7.1.3 Aşınma Davranışı**

CrN ince film kaplamalar, yapısal özellikleri sayesinde taban malzeme olarak kullanılan çeliğin sürtünme katsayısını da düşürmektedirler. CrN kaplı malzemelerin sürtünme katsayılarının düşmesinin sebebi olarak, kaplama malzemesinin taban malzemeye oranla daha sert olması ve yük taşıma kapasitesini arttırması gösterilebilir [26].

#### **2.7.1.4 Oksidasyon Davranışı**

CrN kaplamaların kullanıldığı uygulamalarda, sıcaklık artışı ile CrN yapısında oluşan fazlar şekil 2.18’de görülmektedir. 300 – 500 °C arası sıcaklıklarda, bir oksit fazının oluşumu gözlemlenmemektedir. Sıcaklığın 700 °C’ye çıkarılması sonucunda ise 2 farklı yapı ortaya çıkmaktadır: CrN ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazları. Bu fazın teşekkülü ile film rengi de gümüş beyazdan griye dönüşmektedir. Sıcaklık 900 °C’ye çıkartıldığında ise yapıda sadece Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı kalmaktadır. Bu verilerden anlaşılabileceği üzere CrN kaplamaların oksidasyon başlangıcı olarak 700 °C ve üzerindeki sıcaklıklar

gösterilmektedir. 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapısal bağların bozulduğu gözlemlenmiştir [25].



Şekil 2.18. Sıcaklık artışı ile CrN yapısında oluşan fazlar [25].

Isınma ve oksidasyon, kaplama yapısını sıkı kolonsal yapıdan eş eksenli yapıya dönüştürmekte, ısıtmadan sonra, kaplamanın arayüzeyi ve taban malzeme artık ayırt edilememektedir. Aşağıda, tablo 2.2’de, kalıp malzemesi olarak kullanılan sistemlerde, termal çevrimden önce ve sonra oluşan fazlar incelenmiştir [15].

Tablo 2.2. Kalıp malzemesi olarak kullanılan sistemlerde termal çevrim sırasında oluşan fazlar [15].

| Malzeme   | Önce        | Sonra                                                               |
|-----------|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| H13       | Fe          | Fe, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> |
| H13 – TiN | Fe, Ti, TiN | Fe, Ti, TiN, TiO <sub>2</sub>                                       |
| H13 – CrN | Fe, Cr, CrN | Fe, Cr, CrN, Cr <sub>2</sub> N, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>      |
| Duplex    | Fe, Ti, TiN | Fe, Ti, TiN                                                         |

CrN kaplamaların oksitlenmeleri yüzeyden kaplamanın içine doğru oksijen difüzyonu ile ilgilidir. 900 °C gibi sıcaklıklara çıkıldığında taban malzemeden karbon difüzyonu artmakta, malzeme ve kaplama arasında yoğun karbon konsantrasyonu görülmektedir. Ayrıca 900 °C’de kaplama sertliği 1700 den 1040 Hv’ye düşmektedir. Kaplamasız çelikler ise 700 °C’nin üzerinde 772’den 600 Hv’ye düşmektedir. Bu durum kaplama tabakasında, 700 °C üzerinde, CrN’ün Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’e dönüşerek sertliğini kaybettiğini göstermektedir. Oksidasyon CrN kaplamalarda 700 °C’de başlamakta ve 900 °C’nin üzerinde CrN sert film yapısı tamamen bozulmaktadır. [25]

### 2.7.2 CrN Kaplamaların Diğer Sert Seramik Kaplamalar Karşılaştırılması

Sert seramik kaplamalar, günümüzde endüstrinin pek çok alanında kullanılmaktadırlar. Bu kaplamalar içerisinde en yaygın olarak kullanılan TiN’ün ve diğer bazı sert seramik kaplamaların özellikleri ile CrN kaplamaların özellikleri aşağıda karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablo 2.3 bu kaplamaların bazı temel özelliklerini karşılaştırmalı olarak vermektedir [19].

Tablo 2.3. Yaygın olarak kullanılan bazı sert seramik kaplama türlerinin özellikleri [19].

|                                   | TiN         | TiAlN       | TiCN        | CrN         |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sertlik (Hv 0.05)                 | 2200 - 3300 | 3000 - 3500 | 3000 - 3500 | 2000 - 2500 |
| Sürtünme Katsayısı (çeliğe karşı) | 0,4         | 0,3         | 0,1         | 0,5         |
| Isıl İletkenlik (W/mK)            | 30          | 22          | 43          | -           |
| Oksidasyon Sıcaklığı (°C)         | 600         | 800         | -           | 700         |

- TiN kaplamalar, günümüzde halen malzemeler, makineler ve takımlar için aşınma özelliklerini geliştirici bir rol oynamaktadırlar. TiN’e göre daha yumuşak, kalın ve daha az kırılkan olan CrN kaplamalar, daha yumuşak malzemelerin yüzey korumasında daha avantajlı olarak kullanılmaktadırlar. CrN kaplamalar özellikle, nazaran daha yüksek sıcaklıkların kullanıldığı uygulamalarda TiN kaplamalara alternatif olmaktadır. [18]
- Diğer bir taraftan, son zamanlarda, ince film CrN kaplamaların sert krom kaplamaların yerini aldığı gözlemlenmiştir. [18]

- TiN kaplamaların kalınlıkları 5µm'nin üzerine çıktığı zaman yapıdaki iç gerilmeler artmaktadır. Bu nedenle en fazla 5 - 7 µm kalınlıkta katmanlar biriktirilebilmektedir. İnce film olarak biriktirilen CrN yapılarında ise, iç gerilmelerin düşük olması nedeni ile film kalınlığı 10 µm'ye kadar çıkabilmektedir [28].
- CrN kaplamaların sertlikleri 2400-2800Hv arasındadır. Sertliklerinin yanısıra aşınma dayanımları endüstriyel uygulamalar için uygundur [26].
- Genel olarak yüzey kaliteleri TiN tabakalardan daha iyidir [26].
- CrN ince film kaplamalar 700 °C'ye kadar olan çalışma sıcaklıklarında stabilitelerini kaybetmemektedirler. Basınçlı döküm proseslerinde kullanılan kalıpların genelde 680-720 °C sıcaklıklara dayanmaları gerekmektedir. TiN kaplamalar ise sadece 600 °C'ye kadar ısıl kararlılıklarını koruyabilmektedirler. Basınçlı döküm uygulamaları için düşük sıcaklıklarda biriktirilebilen ve yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanabilecek kaplamalara ihtiyaç vardır. CrN kaplamalar bu iki özelliği de bünyelerinde barındırdıkları için tercih edilmektedirler. [21]
- CrN ve TiN tabakalar, seramik ve inert malzemeler oldukları için değişen ortamlarda korozyon dayanımları yüksektir. Kimyasal kararlılıkları TiN kaplamalara nazaran daha yüksektir. Korozyon testlerine dayanımları çeşitli incelemelerle kanıtlanmıştır. Asidik ve bazik ortamlarda çözünme göstermemeleri diğer bir artıları olarak sıralanabilir [26].
- CrN tabakaların tutunma mukavemetleri, düşük sıcaklıklarda TiN kaplamalara kıyasla daha düşüktür. Bununla birlikte abrazif aşınmaya karşı yüksek mukavemet sergilemektedirler ve kalın kaplandıklarında TiN tabakalara göre daha iyi korozyon mukavemeti gösterirler [26].
- İnce film CrN kaplamalar, özellikle sıvama kalıplarında, pirinç, bakır ve demir boruların imalatında kullanılan çekme matrislerinde, metal enjeksiyon kalıplarında, plastik ve kağıt sanayinde kullanılan bıçak ve makaslarda kullanılmakta ve yüksek performans vermektedirler [18].

Basınçlı döküm uygulamalarında, FBB yöntemi ile biriktirilmiş TiN kaplamalarda pek çok problem ile karşılaşılmaktadır. En önemli sorunlardan biri de standart prosedürler ile üretilen kalıp ve maçalarda yetersiz yapışma görülmesidir. CrN kaplamalar iyi bir termal kararlılığa sahip olmaları ve üst seviyedeki korozyon

dirençleri sayesinde; tüm basınçlı döküm uygulamaları için TiN kaplamalardan daha iyi bir seçim olarak görülmektedirler [18].

### **3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu bölümde, deneysel çalışmaların yürütülmesi, çalışmalar sırasında izlenen yöntem, proses detayları ve parametreleri, kullanılan malzemeler ve karakterizasyon prosesleri üzerine bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

#### **3.1 Giriş**

Yürütülen çalışmalar saha çalışmaları (uygulamalı) ve deneysel olmak üzere iki paralel çalışma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmaları kapsamında ön araştırma süresince belirlenen maça problemlerinin ortadan kaldırılmasına yönelik, söz konusu kalıplarda kullanılan maçalar CrN sert seramik kaplama ile kaplanarak üretim koşullarındaki performans artışı araştırılmış, diğer taraftan deneysel çalışmalar bölümünde kalıp çekirdeklerinde korozyon, erozyon, yapışma ve termal yorulma kaynaklı hasarların araştırılmasına yönelik olarak ikinci bir deney sistemi üzerinde çalışılmıştır. Her iki durum için de numune hazırlama, kaplama ve ön karakterizasyon işlemleri aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir.

#### **3.2 Saha Çalışmaları ve Deneysel Çalışmalar**

Basıncılı döküm kalıplarında ince film sert seramik kaplama uygulaması yoluyla sağlanacak gelişmelerin araştırılmasına yönelik uygulamalı ve deneysel çalışmalar Mita Kalıp ve Döküm Sanayii A.Ş. ile ortak gerçekleştirilen bir TİDEB Projesi kapsamında gerçekleştirilmişlerdir. Söz konusu tesiste yapılan kalıphane ve dökümhane odaklı bir araştırma sonucunda, kalıplarda genelde 60 000 ila 80 000 baskıdan sonra belirgin çatlakların görülmeye başladığı, uygulanan tamirat işlemlerinden sonra ise genel olarak 150 000 parçalık döküm sayılarına kadar çıkılabildiği gözlemlenmiştir. Maça ve iticilerde ise 10 000 – 15 000 baskıdan sonra sorunlarla karşılaşıldığı belirlenmiştir. Söz konusu koşullarda, gerek bakım onarım işlemleri için üretimin durması, gerek ürün kalitesindeki düşme nedeniyle üretim olumsuz etkilenmektedir.

### 3.2.1 Saha Çalışmaları

Tesiste üretimi olumsuz etkileyen parametrelerin araştırması yapılmıştır. Bunun için 6 adet değişik ürüne ait üretim planı yapılmış ve planlanan üretim ile gerçekleşen üretim sayıları karşılaştırılmıştır. Bu veriler ile tablo 3.1 oluşturulmuştur.

Tablo 3.1 Tesiste Al döküm parçalara ait üretim planları ve gerçekleşme oranları.

| Kalıp No       | Parça Adı               | Planlanan Çalışma Süresi (dak) | Gerçekleşen Süre (dak) | Planlanan Üretim Adedi | Gerçekleşen Üretim Adedi | % Kayıp Süre | % Kayıp Miktar |
|----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------|----------------|
| BK20           | Mobylette Sağ Elcik     | 8340                           | 5831                   | 11500                  | 8347                     | 30,8         | 27,4           |
| BK38           | M131 Termostat Gövdesi  | 2700                           | 1869                   | 3780                   | 2090                     | 29,7         | 44,7           |
| BK59           | AV7 Karter              | 2700                           | 1408                   | 2700                   | 1084                     | 47,85        | 59,85          |
| BK72           | AV10 Kulas              | 6090                           | 5303                   | 6045                   | 4562                     | 13           | 24             |
| BK73           | AV10 Karter             | 4500                           | 3180                   | 4500                   | 2664                     | 29,3         | 40,8           |
| BK88           | V1583 Termostat Gövdesi | 6090                           | 4619                   | 8959                   | 5704                     | 24,15        | 36,3           |
| ORTALAMA KAYIP |                         |                                |                        |                        |                          | 29,1         | 34,7           |

Planlanan çalışma süresinde hedeflenen parça üretim adetleri, önceden yapılan üretim etütleri ışığında belirlenmiştir. Tablo 3.1’de görüleceği üzere gerçekleşen üretim süreleri ve adetleri çeşitli nedenlerden dolayı planlanan süre ve adetlerin hep altında kalmıştır. Ayrıca görüleceği üzere süre kaybı %29,1 ve üretim kaybı ise %34,7 düzeyinde oluşmuştur. Bu kayıpların nedenleri incelenmiş ve 11 temel başlık altında toplanmıştır:

- 1) Potaya külçe şarj nedeni ile döküm metali sıcaklığının düşmesi
- 2) Kalıp sıcaklığının yetersiz olması
- 3) Kalıbın sabit tarafında parçanın sıkışması
- 4) Kalıp enjeksiyon alanında meydana gelen yapışmalar
- 5) Piston aşınması ve kırılması
- 6) Maça ve iticilerin kırılması ve kopması
- 7) Maçalarda sıyırma ve ezilmeler
- 8) Maça üzerinde malzeme yapışması ve birikmesi
- 9) Enjeksiyon tezgahında mekanik arıza
- 10) Enjeksiyon tezgahında elektrik arızası
- 11) Diğer sebepler

Yukarıda belirlenen hata türlerinin kaynak oluşturduğu aksaklıkların 6 değişik parçanın kalıpları ile ilişkilendirilmesi tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Oluşan hataların kayıp süredeki paylarının kalıplara göre oranı.

| HATA ÇEŞİDİ<br>KALIP NO                      | 1  | 2   | 3  | 4  | 5    | 6   | 7    | 8   | 9   | 10  | 11  | TOPLAM<br>KAYIP SÜRE<br>(dak) |
|----------------------------------------------|----|-----|----|----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|
| BK20                                         | 2  |     |    | 10 | 15   | 30  | 20   | 10  | 5   |     | 8   | 2509                          |
| BK38                                         |    | 2   | 5  | 15 | 15   | 30  | 20   |     |     |     | 15  | 831                           |
| BK59                                         |    |     | 10 | 20 |      | 30  | 20   |     |     | 10  | 10  | 1292                          |
| BK72                                         | 5  |     | 5  | 10 | 20   | 20  | 20   | 5   | 10  |     | 5   | 787                           |
| BK73                                         |    |     | 10 | 5  | 15   | 25  | 20   | 10  |     | 5   | 10  | 1320                          |
| BK88                                         | 5  |     | 30 |    | 15   | 15  | 15   |     |     | 10  | 10  | 1471                          |
| HATA %'Sİ TOPLAMI                            | 12 | 2   | 60 | 60 | 80   | 150 | 115  | 25  | 15  | 25  | 58  | TOPLAM                        |
| HATANIN KAYIP SÜRE<br>İÇERİSİNDEKİ ORANI (%) | 2  | 0,3 | 10 | 10 | 13,3 | 25  | 19,1 | 4,1 | 2,5 | 4,1 | 9,6 | 8210                          |

Tablo 3.2’de görülen kalıp, itici ve maça kaynaklı hataların, toplam kayıp sürede %81,5 gibi yüksek bir değere ulaştığıdır. Kalıp, itici ve maçalarda görülen sorunların giderilmesine yönelik, kalite sistemi çerçevesinde OHTEA (Olası Hata Türü Etkisi Analizi) çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen yaklaşımlar sonucunda bu parçalarda oluşan hasar mekanizmalarını engellemek üzere alınabilecek önlemler sıralanmış ve bunlar arasından sert seramik kaplama yoluyla yüzey özelliklerinin geliştirilmesi uygulamasına karar verilmiştir. Sert seramik kaplama uygulamasının, tesiste üretilen ve tablo 3.1’de isimleri görülen parçaların kalıplarının maçalarında denenmesi uygun bulunmuştur.

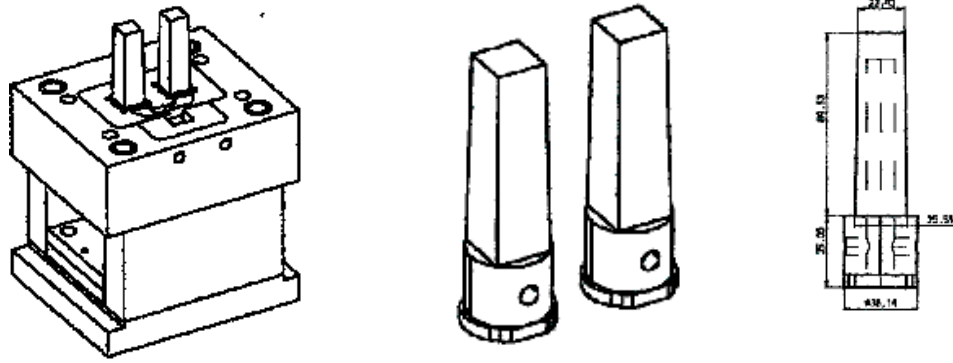
Tablo 3.3 Sert seramik kaplama uygulaması sonucu sağlanması beklenen faydalar.

| GELİŞTİRME HEDEFİ                                            | KATKISI                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kalıp ömrü uzatılması                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kalıp tasarrufu</li> </ul>                                                                                                                                         |
| Kalıp kalitesinin geliştirilmesinin ekonomik etkisi          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ürünlerde boyursal hassasiyet</li> <li>Ürünlerde yüzey kalitesi artışı</li> </ul>                                                                                  |
| Maça ve iticilerin ömürlerinin uzatılmasının ekonomik etkisi | <ul style="list-style-type: none"> <li>Duruşların azalması</li> <li>Üretimin verimliliği</li> <li>Bakım onarım biriminin yükünün azalması</li> </ul>                                                      |
| Temiz üretim                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Daha az enerji kullanımı</li> <li>Daha az kirletici</li> <li>Daha az ikincil hammadde</li> </ul>                                                                   |
| Kaplamalı kalıp üretimi                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Nitelikli ve katma değeri yüksek kalıp üretiminden elde edilecek gelir</li> <li>Aynı kalıptan daha fazla parça</li> <li>Ürün kalitesinin geliştirilmesi</li> </ul> |
| Genel performans artışı                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Daha kaliteli müşteriye ulaşma</li> <li>Pazarın genişlemesi</li> <li>İhracat potansiyelinde artış</li> </ul>                                                       |

Sert seramik kaplama uygulaması sonucunda, kalıp yüzeyi ve ömrü gibi parametrelerde oluşacak pozitif gelişmelerin prosese yansımaları sonucu elde edilmesi beklenen kazançlar tablo 3.3’te sıralanmıştır.

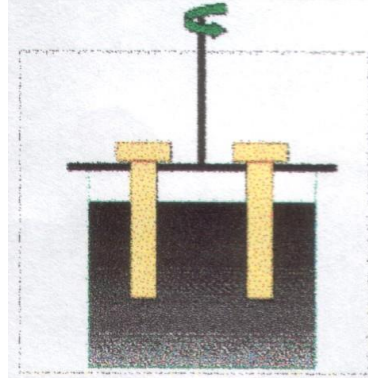
### 3.2.2 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar kapsamında ise; termal yorulma deney sisteminde (dip test deney sistemi) kalıplarda karşılaşılabilecek en zor koşulları simüle etmesi açısından keskin köşelere sahip, Orvar Supreme (2344) çelikten yapılmış, vakumda ısıtıl işlem uygulanmış ve 46 HRc sertlikte numune maçalar kullanılmıştır. Numune maçaların şematik resmi ve kalıbın genel görünüşü Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Termal yorulma deney sisteminde kullanılan kalıp ve maçaların şematik görünüşleri.

Termal yorulma deneyi olarak, en yaygın kullanılan sistem “dip test” sistemidir. Sistem daldırma deney sistemi olarak adlandırılabilir ve şematik görüntüsü şekil 3.2’de verilmiştir. Deney, temel olarak, bir pota içerisinde eritilen alüminyum alaşımına, bir bağlantı istenilen işlemin uygulandığı maçaların daldırılması ve sıvı metal içerisinde döndürülmesine dayanır. Maçalar belli bir süre sıvı metale maruz bırakılır ve dışarı çıkarılırlar. Aynı döngü istenilen sayıda tekrarlanabilir. Ancak daldırma testi, basınçlı döküm koşullarını tam anlamıyla simüle etmekten uzak bir testtir. Basınçlı sıvı metalin çarpması, yağlama ve soğutucu uygulamaları gibi birçok etken deney düzeneğinde yer almamaktadır. Bu sebeple deneysel çalışmalar kapsamında kaplanan numunelerin, daldırma testi düzeneğinde teste tabi tutulmasından vazgeçilmiş ve gerçek basınçlı döküm sistemi koşullarında denenmelerine karar verilmiştir.



Şekil 3.2. Daldırma testi (dip test) deney düzeneğinin şematik görünümü.

Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıbın ve dökülen parçaların fotoğrafı şekil 3.3’te görülmektedir.



Şekil 3.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıbın fotoğrafı.

Şekil 3.3’de fotoğrafı görülen kalıbın kullanıldığı döküm işleminde, soğuk kamaralı 60 ton döküm presi –enjeksiyon döküm, mineral yağ bazlı katı pasta ile yağlama döngüsü içerisinde- kullanılmıştır. Döküm alaşımı olarak silisyum içeriği yüksek olan E160 alüminyum alaşımı kullanılmış ve işlem 680 °C’de gerçekleştirilmiştir. Döküm alaşımının ve kalıp çeliğinin bileşimleri tablo 3.4’te görülmektedir.

Tablo 3.4. Kullanılan kalıp çeliği ve alüminyum alaşımının bileşimleri.

| wt%                      | Al    | Si       | Cu        | Fe    | Mg  | Mn  | C   | Cr  | Mo  | Ti  | Zn  | V   |
|--------------------------|-------|----------|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>ORVAR<br/>SUPREME</b> | -     | 1,0      | -         | kalan | -   | 0,4 | 0,4 | 5,3 | 1,3 | -   | -   | 0,9 |
| <b>E160</b>              | kalan | 7,5-9,00 | 3,00-4,00 | 1,0   | 0,3 | 0,5 | -   | -   | -   | 0,2 | 1,0 | -   |

### 3.2.3 Numune Hazırlama

Kaplama tabakasının yüzeye iyi yapışması ve özelliklerini tam olarak sergileyebilmesi açısından, kaplama işlemi öncesi yapılan yüzey temizliği büyük

önem taşımaktadır. Saha çalışmalarında kullanılan çeşitli firmalardan alınmış H13 kalıp çelikleri ve deneysel çalışmalarda kullanılan Orvar Supreme (2344) çeliğinden imal edilen maçaların yüzeyleri, kaplama işleminden önce metalografik yöntemlerle temizlenmiş ve parlatılmıştır.

### 3.2.4 Kaplama Parametreleri

Çalışmalarda kullanılan kaplamalar İ.T.Ü. Kaplama Karakterizasyon Laboratuvarları bünyesinde bulunan “Novatec-SIE, Model: NVT-12 KA-FBB” cihazı ile katodik ark fiziksel buhar biriktirme (KA-FBB) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Yüzeyleri temizlenmiş numuneler tablo 3.5’te verilen temel parametreler kullanılarak kaplama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Tablo 3.5. İnce film CrN kaplamaların temel kaplama parametreleri.

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| Kaplama Süresi (dk)    | 90                   |
| Katod Akımı (A)        | 90                   |
| Bias Voltajı (V)       | 150                  |
| Kaplama Sıcaklığı (°C) | 250                  |
| Kaplama Basıncı (torr) | $7,5 \times 10^{-3}$ |

Kaplama işlemine geçilmeden önce, numunelere kaplama ünitesi içerisinde bias voltajı ve sıcaklık ile son bir yüzey temizleme işlemi uygulanmıştır.

### 3.2.5 Kalınlık Ölçümleri

Kullanılan numunelerin kalınlık ölçümleri, 20 mm çapında çelik bilya ve 1 µm’lik elmas aşındırıcı kullanılarak Calotest kalınlık ölçüm cihazı ile ölçülmüştür.

### 3.2.6 Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri için İ.T.Ü. Kaplama Karakterizasyon Laboratuvarları bünyesinde yer alan 0,4-1000 mN aralığında, minimum 0,2 mN’luk adımlarla yük uygulayabilen ve 2 nm derinlik ölçüm hassasiyetine sahip “Fisher HP100 Ultra Mikrosertlik” cihazı kullanılmıştır.

### **3.2.7 Yüzey Pürüzlülüğü**

Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için Perthen Perthometer S&P Profilometre cihazı, Focodyn optik uç ile kullanılmıştır. LT: 1,750  $\mu\text{m}$ , VB: 62,5 parametreleriyle ölçüm yapılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) alınmıştır.

Ortalama pürüzlülük değerini veren (Ra); tüm pürüzlülük profil alanının aritmetik ortalaması olarak tanımlanmaktadır (DIN 4762, DIN 4768 ve ISO 4287/1). Ra değeri yüzey profilinin şekli açısından herhangi bir bilgi vermemesine rağmen, yüzey pürüzlülüğünün gerçek büyüklüğünü belirlemek için en çok kullanılan yüzey parametresidir.

#### 4. SONUÇLAR ve İRDELEME

Deneysel çalışmalar ve saha çalışmaları bölümlerinde elde edilen sonuçların bu bölümde genel olarak verilmesi amaçlanmıştır. Bu sonuçlar arasında sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve kalınlık deneyleri sonuçlarının yanısıra, kaplamalı ve kaplamasız maçaların performans değerlendirmeleri ile işlem sonrasında durum incelemeleri de yer almaktadır.

##### 4.1 Ön Karakterizasyon Sonuçları

Saha çalışmalarında kullanılan kaplanmamış ve CrN kaplı maçalara ait ortalama sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve kalınlık değerleri aşağıda tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1. Saha çalışmalarında kullanılan maçalara ait ön karakterizasyon sonuçları.

| Numune              | Kaplama Kalınlığı (μm) | Ra (μm) | Sertlik   |
|---------------------|------------------------|---------|-----------|
| Taban Malzeme (H13) | -                      | 0,55    | 48 (Rc)   |
| CrN Kaplı Maçalar   | 3 ± 0,4                | 0,39    | 3095 (Hv) |

Tabloda görülen değerler kullanılan maçaların genel bir aritmetik ortalamasını yansıtmaktadır. Değerler birbirlerinden farklı olmakla birlikte, genel olarak aynı prosedür içerisinde hazırlandıkları ve teste tabi tutuldukları için küçük farklarla birbirlerinden ayrılmaktadırlar.

Deneysel çalışmalarda kullanılan sisteme ait ön karakterizasyon sonuçları ise tablo 4.2’de verilmiştir.

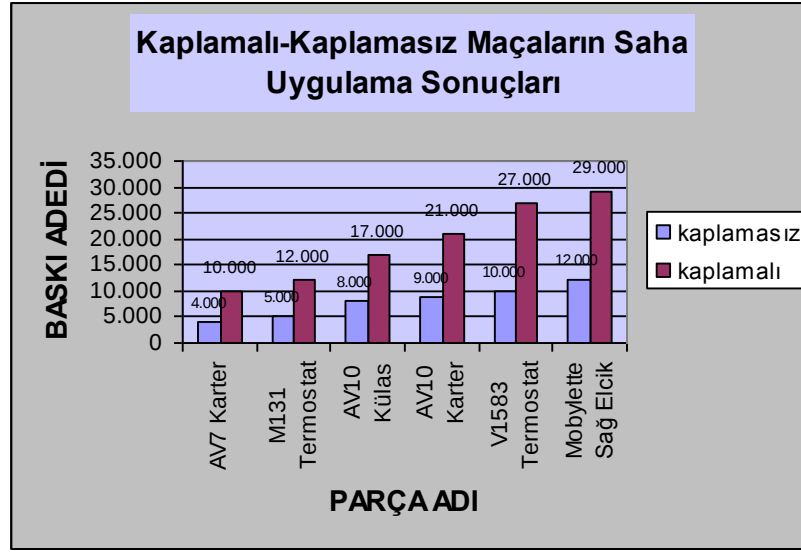
Tablo 4.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan maçaların ön karakterizasyon sonuçları.

| Numune                        | Kaplama Kalınlığı (μm) | Ra (μm) | Sertlik   |
|-------------------------------|------------------------|---------|-----------|
| Taban Malzeme (Orvar Supreme) | -                      | 0,08    | 46 (Rc)   |
| CrN Kaplı Maçalar             | 3 ± 0,2                | 0,25    | 3000 (Hv) |

#### 4.2 Saha Çalışmalarının Sonuçları ve İrdelenmesi

Tesiste kullanılmak üzere CrN kaplanan maçalar, olağan üretim şartlarında, kaplamasız olarak kullanılan maçalarla aynı şartlarda denenmişlerdir. Burada amaç, fabrika üretim şartlarında kaplamalı ve kaplamasız maçaların bir karşılaştırmasını yapabilmektir.

Saha uygulamalarında kullanılmak üzere seçilmiş olan maçaların gösterdikleri performans, şekil 4.1’de grafik olarak görülmektedir.



Şekil 4.1. Kaplamalı ve kaplamasız maçaların saha uygulama sonuçları.

Şekil 4.1’den görüldüğü üzere kaplama uygulamasının yapıldığı maçalar, kaplamasız maçalara nazaran iki kat kadar veya daha yüksek bir performans sergilemişlerdir. Ayrıca, kaplamasız olarak kullanılan maçalar, proses boyunca birçok kere, üretim durdurulmak suretiyle sökülüp yüzey temizleme işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Kaplamalı olan maçalarda ise yüzeye yapışan alüminyumun temizlenmesi sebebiyle üretim duruşu olmamıştır. Diğer taraftan, kaplı olarak kullanılan maçalar genellikle mekanik arızalar, operatör hataları gibi, “diğer sebepler”den ömürlerini tamamlamışlardır. Bu durum da, gerçek performansın bu tablonun yansıttığından daha yüksek olduğunu belirtmektedir.

Çalışmalarda kullanılmak üzere kaplanan maçaların bazılarının, işleme alınmadan önce ve kullanım ömürlerini tamamladıktan sonra alınan fotoğrafları şekil 4.2’de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.2. Kaplanan maçaların fotoğrafları (a) Basınçlı döküm işleminden önce (b) işleminden sonra.

Kaplamasız maçaların performansına ve tesiste yarattıkları zaman ve iş kaybına yönelik tablo daha önceki bölümde, tablo 3.1’de verilmişti. Tablo 4.3’te ise kaplamalı maçaların kullanılmasıyla birlikte sağlanan zaman ve iş tasarrufu açık olarak görülmektedir.

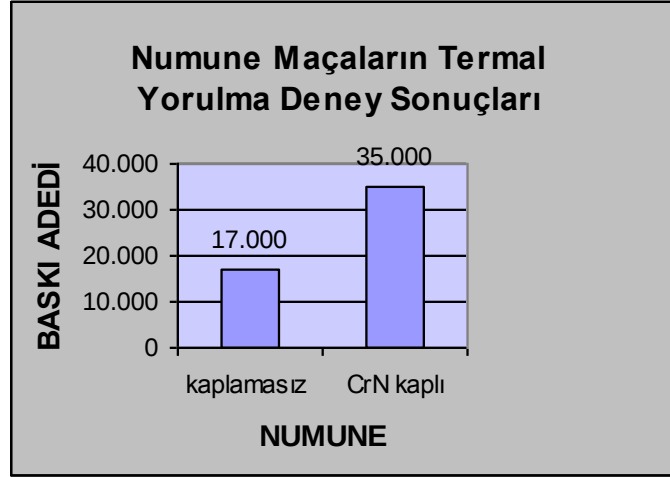
Tablo 4.3. Kaplı maçalara ait saha çalışmaları sonuçları.

| Kalıp No              | Parça Adı               | Planlanan Çalışma Süresi (dak) | Gerçekleşen Süre (dak) | Planlanan Üretim Adedi | Gerçekleşen Üretim Adedi | % Kayıp Süre | % Kayıp Miktar |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------|----------------|
| BK20                  | Mobyette Sağ Elcik      | 7920                           | 6940                   | 9620                   | 8171                     | 12           | 15             |
| BK38                  | M131 Termostat Gövdesi  | 4850                           | 3745                   | 6790                   | 4333                     | 22,8         | 36,2           |
| BK59                  | AV7 Karter              | 3540                           | 2337                   | 3540                   | 1877                     | 34           | 47             |
| BK72                  | AV10 Kulas              | 5900                           | 5328                   | 5856                   | 4773                     | 9,7          | 18,5           |
| BK73                  | AV10 Karter             | 12870                          | 10168                  | 12870                  | 9267                     | 21           | 28             |
| BK88                  | V1583 Termostat Gövdesi | 8730                           | 7264                   | 12842                  | 9195                     | 16,8         | 28,5           |
| <b>ORTALAMA KAYIP</b> |                         |                                |                        |                        |                          | <b>19,25</b> | <b>28,8</b>    |

#### 4.3 Deneysel Çalışmalarının Sonuçları ve İrdelenmesi

Basınçlı döküm kalıplarında görülen en önemli hata türlerinden biri olan termal yorulmayı simüle etmesi amacıyla denenen, keskin köşelere sahip numunelerle yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ise şekil 4.3’te görülmektedir.

Şekil 4.3’e genel olarak bakıldığında kaplamasız olarak deneye tabi tutulan maçanın 17 000 baskıdan sonra tahrip olduğu görülebilir. CrN ince film kaplanmış olarak denenen maçanın ise kaplamasız maçaya nazaran, saha çalışmalarındaki sonuçları doğrular biçimde iki kat veya daha uzun bir ömür sergilediği görülebilir. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar da saha çalışmalarını desteklemektedir.



Şekil 4.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneleri deney sonuçları.

Deneysel süresince, saha çalışmalarında da olduğu gibi, kaplamasız olarak kullanılan numuneler zaman zaman sökülüş ve yüzeylerine yapışan alüminyum tabakası temizlenmiştir. Kaplamasız olarak deneye tabi tutulan numunelerde görülen yapışma 17 000'inci baskıdan sonra numunenin kullanılamaz hale gelmesine sebep olmuştur. Kaplamasız numunelerin 8 000 ve 17 000 baskıdan sonra alınan fotoğrafları şekil 4.4'te görülmektedir.



a)



b)

Şekil 4.4 a) 8 000, b) 17 000 baskıdan sonra kaplamasız maçaların görünümü.

Kaplamasız maçalarda, 8 000 baskıdan sonra görülen hasar başlangıcı (şekil 4.4a, işaretli bölge), 17 000 baskıdan sonra ise aynı noktada (şekil 4.4b) bir malzeme toplanması görülmektedir.

Deneylerde kaplamalı olarak kullanılan maçaların 35 000 baskıdan sonra çekilen fotoğrafı ise şekil 4.5'te görülebilir.



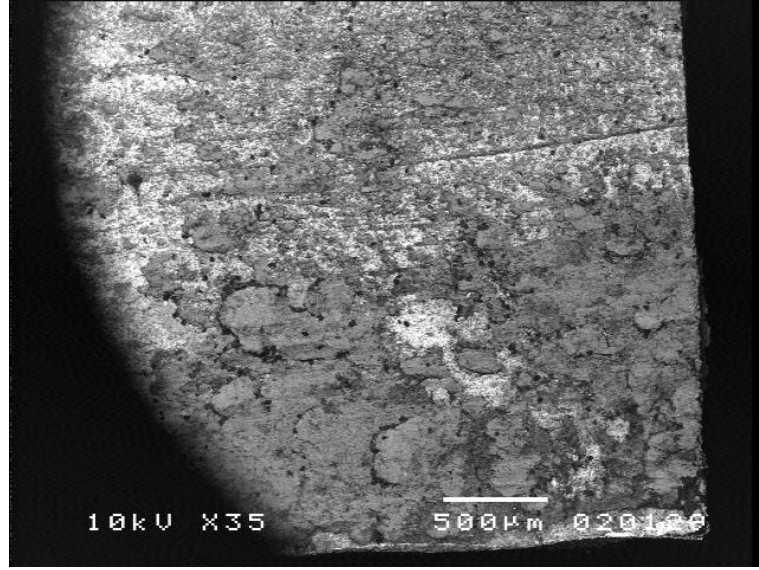
Şekil 4.5. CrN kaplı maçanın 35 000 baskıdan sonraki görüntüsü.

Şekil 4.4 ve şekil 4.5'ten görüldüğü üzere kaplamasız olarak kullanılan maçalar, uygulanan yüzey temizleme işlemlerine rağmen 17 000 baskı sonucunda kullanılamaz hale gelmişlerdir. Kaplamalı maçaların ise 35 000 baskı sonucunda tahribata uğradıkları görülmüştür. Ancak kaplamalı maçalar halen bir müddet daha kullanılabilir haldedirler. Buradan kaplamalı maçalar üzerindeki kaplama tabakasının halen koruma görevine devam ettiği belirtilebilir.

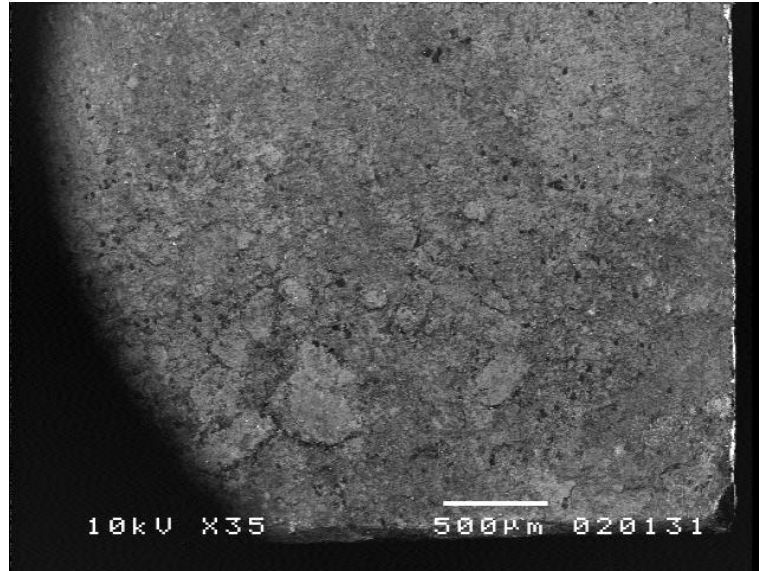
#### 4.3.1 DeneySEL Çalışmalarda Kullanılan Numunelere Ait SEM Görüntüleri

DeneySEL çalışmalarda kullanılan kaplamalı ve kaplamasız maçaların uğradıkları hasarın daha derinliğine incelenmesi maksadıyla, numunelerin hasarlı bölgelerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çalışmalar yapılmıştır. SEM görüntüleri maçalarda tahribatın en fazla olması beklenen yolluk girişlerinden alınmıştır.

Şekil 4.6'da kaplamalı ve kaplamasız maçaların üstten görünümüleri verilmiştir. Üst bölge, maçanın sıvı alüminyum ile temasta olan bölgesidir. Fotoğraflar, geri saçılan elektron (BSE) görüntüleridir ve koyu renkli bölgeler daha hafif olan alüminyum elementini, açık renkli bölgeler ise daha yüksek atom numarasına sahip elementleri göstermektedirler. Her iki fotoğraf da temel olarak, çelik malzemeye yapışan alüminyumun görünümünü yansıtmaktadırlar.



a)

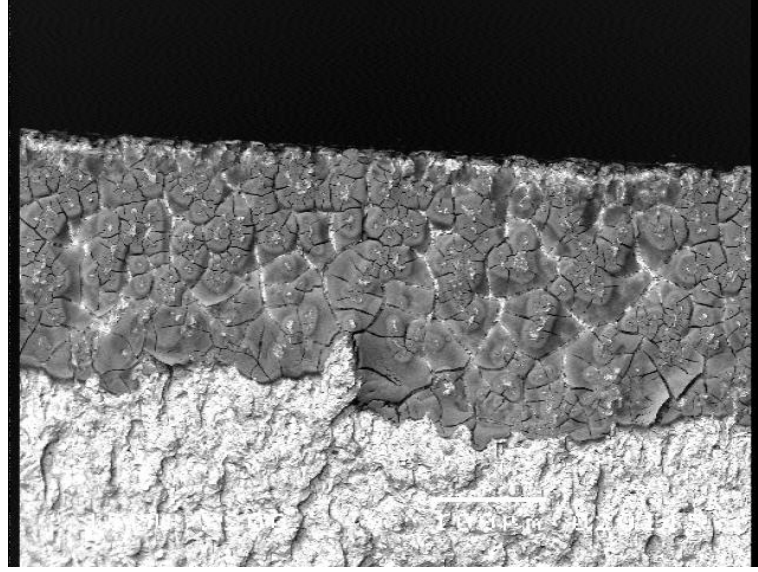


b)

Şekil 4.6. a) CrN kaplı b) kaplamasız maçaların sıvı alüminyum ile temas eden yüzeylerinin SEM görüntüleri (10 kV, x35 büyütme).

Şekil 4.6'ya bakarak, genel olarak kaplamasız maçaya yapışan alüminyum miktarının, kaplamasız maçaya yapışandan daha fazla olduğunu söylemek mümkündür. Kaplamalı numunelerde yer yer kalıp çeliği görülebilmesine rağmen, kaplamasız numunede yüzeye yayılmış bir alüminyum tabakası mevcuttur.

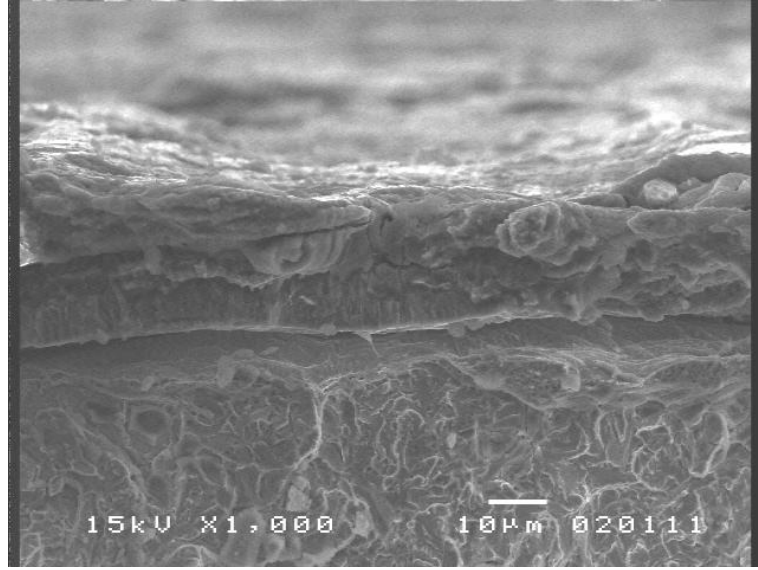
Şekil 4.7'de ise kaplamasız numunenin, 17 000 baskıdan sonra çekilen SEM fotoğrafı görülmektedir. Fotoğraf numunenin kesitinden alınmıştır ve üstte kalan yüzey maçanın sıvı alüminyumla temasta olan bölgesidir.



Şekil 4.7. Kaplamasız maçanın kesitten alınan SEM görüntüsü (BSE, 10 kV, x200)

Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplamasız maçaların SEM ile çekilen mikrograflarında, yüzeyden itibaren  $\sim 100 \mu\text{m}$ 'lik bir oksit tabakasının olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgeden alınan analizlerde, demirle birlikte yüksek miktarda oksijene rastlanmıştır. Bu şekilde bir oksit tabakası oluşumunun sebebi, kalıp çeliğinin ısıtılma işleminden sonra yüzey parlatma işlemine tabi tutulmamasıdır. Yüzey parlatma işlemi ile bu oksit tabakasının kaldırılması mümkün olmaktadır. Isıtılma işleminden sonra yüzey temizliği yapılmayan çeliklerde benzer bir oluşum gözlemlendiği bilinmektedir. Yüzey parlatma işleminin uygulanmamasının sebebi oluşan oksit tabakasının çeliği koruyucu özellik taşımasıdır. Bu sebeple tabaka olduğu gibi bırakılmış ve deneylere bu şekilde devam edilmiştir. 17 000 baskıdan sonra alınan fotoğrafta, yüzeye yakın bölgelerde alüminyum yapışması mevcuttur. Çelik yüzeyindeki alüminyum tabakası gözönüne alındığında, alüminyum ile çeliğin yüzeye yakın bölgelerde intermetalik bileşikler oluşturmuş olmaları beklenebilir.

Şekil 4.8'de ise kaplamalı maçaya ait kesitten alınan SEM fotoğrafı görülmektedir. Üst kısım işlem esnasında alüminyumla temasta olan yüzeydir. Şekil 4.8'de kaplama tabakası net bir biçimde görülebilmektedir. Muhtemelen numunenin kırılması sırasında kaplama tabakası taban malzemeden bir miktar ayrılmıştır. Bunun dışında kaplama katmanı, birkaç ufak bölge haricinde, hasar görmemiş bir şekilde taban malzeme üzerinde varlığını korumaktadır. Kaplama tabakasının halen kalıp çeliğini koruduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.8. CrN kaplı numunenin 35 000 baskıdan sonra kesitten alınmış SEM görüntüsü (BSE, 15 kV, x1000)

Yüzeyde yapışmış halde görülen alüminyum tabakasının ise kimyasal bir reaksiyon sonucu yapışmış olmaktan ziyade, fiziksel bir yapışma gösterdiği söylenebilir. Numunede termal yorulmaya ait çatlaklara rastlanmamıştır. Film yapısı hala bütünlüğünü koruduğu için, film ile sıvı alüminyum arasında da kimyasal bir reaksiyon beklenmediğinden, herhangi bir intermetalik bileşik oluşumu öngörülmemektedir.

## 5. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, basınçlı döküm kalıp ve maçalarına uygulanan krom nitrür (CrN) sert seramik ince film kaplamalar sayesinde , kalıp ve maçaların ömürlerinin uzatılması hedeflenmiş ve bu amaçla saha çalışmaları ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma sonunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

Saha Çalışmaları;

- CrN kaplanmış maçalar, uygulamaya tabi tutuldukları her kalıpta, kaplamasız maçalardan 2 kere veya daha fazla servis ömrü sergilemişlerdir.
- Kaplamasız maçaların zaman zaman üretim durdurulmak suretiyle yüzey temizlikleri yapılmış ve yüzeylerine yapışan alüminyum tabakası temizlenmiştir. Bu işlem de zaman ve dolayısıyla değer kaybına sebep olmaktadır.
- CrN kaplı maçalarda ise yüzey temizliği için üretim durdurulması sözkonusu olmamıştır. Bu durum da saha çalışmaları sonucunda elde edilen sayısal bulguların daha da üzerinde bir ekonomik fayda sağlanabileceğini simgelemektedir.
- Genel bir proses optimizasyonu sağlanması sonrasında, basınçlı döküm prosesinde kullanılan kalıp ve maçaların tamamen CrN kaplanması ile üretimde belirgin bir kalite artışı olacağı ve önemli ölçüde ekonomi sağlanacağı öngörülmektedir.

Deneysel Çalışmalar;

- Daldırma testi (dip test), basınçlı döküm prosesinin şartlarını tam anlamıyla simüle edememektedir.
- Saha çalışmalarında da görüldüğü üzere, kaplamasız maçalar, yüzey temizliği sebebiyle, zaman zaman prosesin durmasına yol açmaktadırlar.

- CrN kaplı maçalar ise prosesi hiç durdurmamalarının yanısıra, kaplamasız bir maça ile yapılan 17 000 baskının iki katının üzerinde, 35 000 baskı yapmışlardır.
- 35 000 baskıda durdurulan CrN kaplı maçanın yüzeyi halen iyi durumdadır.
- Elektron miroskobu (SEM) ile yapılan incelemelerde 35 000 baskıdan sonra bile CrN kaplama tabakasının bütünlüğünün bozulmadığı gözlemlenmiştir. Kaplama tabakasında yer yer küçük hatalara rastlanmasına rağmen, CrN film kaplama tabakası kalıp eliğı ile sıvı metal arasında koruyucu niteliğini halen sürdürmektedir.
- Kaplamasız numunede ise 17 000 baskıdan sonra büyük ölçüde yapışma ve yüzey tahribatı gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Alüminyum Enjeksiyon Döküm Kalıplarının Islahı Kalıp ve Maça Ömürlerinin Yüzey İşlem ve Sert Seramik Kaplama Yolu ile Geliştirilmesi, TİDEB Proje 2. Dönem Raporu, 2000
- [2] **Gulizia, S., Jahedi, M.Z., Doyle. E.D.**, 2001. Performance Evaluation of PVD Coatings for High Pressure Diecasting, Surface and Coatings Technology, 140, 200-205
- [3] **Mitterer, C., Holler, F., Üstel F., Heim, D.**, 2000. Application of Hard Coatings in Aluminium Diecasting-Soldering, Erosion and Thermal Fatigue Behaviour, Surface and Coatings Technology, 125, 233-239
- [4] Diecasting Info Sheet, web makalesi, [www.uddeholm.com](http://www.uddeholm.com)
- [5] **Ürgen, Ş., Yardımcı, B., Ürgen, M. Taptık. Y., Çakır, A.F.**, 2001. Alüminyum Enjeksiyon Döküm Kalıplarında Ömür Arttırmaya Yönelik Yüzey İşlemleri, II. Döküm Sempozyumu
- [6] **Doehler, D.D.**, 1951. Diecasting, New York
- [7] **Street, A.C.**, 1977. The Diecasting Book, Portullis Press LTD England
- [8] **Tekin, E.**, 2000. Kalıpların İşgörmezlik Çözümlemesi ve İşgörmez Duruma Düşen Bir Enjeksiyon Kalıbının Olay İncelemesi, Uluslararası Kalıp Çelikleri Semineri, 18-20 Ekim, İstanbul
- [9] **Mitterer, C., Holler, F., Lugmair, C., Nöbauer R., Kullmer, R., Teichert, C.**, 2001. Oprimization of Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition Hard Coatings for Their Application in Aluminium Diecasting, Surface and Coatings Technology, 142-144, 1005-1011
- [10] **Molinari, A., Pellizzari, M., Straffelini, G., Pirovano, M.**, 2000. Corrosion Behavior of a Surface-treated AISI H11 Hot Work Tool Steel in Molten Aluminium Alloy, Surface and Coatings Technology, 126, 31-38
- [11] **Gopal, S., Lakare, A., Shivpuri, R.**, 2000. Soldering in Diecasting: Aluminium Alloy and Die Steel Interactions, Diecasting Engineer, May/June, 70-81

- [12] **Hatman, A.**, 2000. Takım Çelikleri El Kitabı, Assab Korkmaz Çelik Tic. ve San. A.Ş.
- [13] **Knotek, O., Löffler, F., Bosserhoff, B.**, 1993. PVD Coatings for Diecasting Moulds, Surface and Coatings Technology, 62, 630-634
- [14] **Lindow, H.**, 18-20 Ekim 2000. Failure Analysis and Material Recommendation in Aluminium Diecasting, Uluslararası Kalıp Çelikleri Semineri, İstanbul
- [15] **Starling, C.M.D., Branco, J.R.T.**, 1997. Thermal Fatigue of Hot Work Tool Steel with Hard Coatings, Thin Solid Films, 308-309, 436-442
- [16] **Yücel, Ö., Sandberg, O., Roche, P.**, 18-20 Ekim 2000. Heat Treatment of Hot Work Tool Steels in Vacuum Furnace, Uluslararası Kalıp Çelikleri Semineri, İstanbul
- [17] **Heim, D., Holler, F., Mitterer, C.**, 1999. Hard Coatings Produced by PACVD Applied to Aluminium Diecasting, Surface and Coatings Technology, 116-119, 530-536
- [18] **Navinsek, B., Panjan, P., Milosev, I.**, 1997, Industrial Applications of CrN (PVD) Coatings, deposited at High and Low Temperatures, Surface and Coatings Technology, 97, 182-191
- [19] **Ürgen, M.**, 11-15.06.1997. Modern Yüzey İşlem Teknolojileri ve Türkiye'deki Gelişmeler, Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 333-350
- [20] **Çakır, A.F., Ürgen, M.**, 2000. Sert Seramik Kaplamalar Ders Notları, İ.T.Ü. Malzeme-Metalurji Mühendisliği Bölümü
- [21] **Vyskocil, J., Musil, J.**, 1990. Arc Evaporation of Hard Coatings; Processes and Film Properties, Surface and Coatings Technology, 43/44, 299-311
- [22] **Nishibori, M.**, 1992. How to Solve Problems of Films Coated by Arc Methods, Surface and Coatings Technology, 52, 229-233
- [23] **Keleşoğlu, E., Ünal, A.**, Eylül-Ekim 2001. Basınçlı Döküm Kalıplarında Sert Seramik Kaplamaların Performansına Etkileri, Kalıp Dünyası, 11, 40
- [24] **Aharonov, R.R., Chellapilla, Janoss, B., S., Shivpuri, R., Lakare, A.**, 1999. An Investigation of the Corrosion of H13 Steel Coated with CrN in Molten Aluminium Alloys Effect of Steel Surface Preparation and

- [25] **Lee, S.S., Ho, W.Y., Lai, F.D.**, 1995. Effect of Substrate Surface Roughness on the Characteristics of CrN Hard Film, *Materials Chemistry and Physics*, 43, 266-273
- [26] **Su, Y.L., Yao, S.H., Wie, C.S., Kao, W.H., Wu, C.T.**, 1999. Comparison of Wear, Tensile, and Fatigue Properties of PVD Coated Materials, *Materials Science and Engineering*, 15, 73-77
- [27] **Chen, Z. W., Fraser, D. T., Jahedi, M. Z.**, 1999. Structures of Intermetallic Phases Formed During Immersion of H13 Tool Steel in an Al-11Si-3Cu Diecasting Alloy Melt, *Materials Science and Engineering*, 260, 188-196
- [28] **Navinsek, B., Panjan, P., Cvelbar, A.**, 1995. Characterization of Low Temperature CrN and TiN (PVD) Hard Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 74-75, 155-161

## **ÖZGEÇMİŞ**

Şeyda Ürgen 1976 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini Hamdullah Suphi Tanrıöver İlkokulu'nda; orta ve lise eğitimini Kaşkarlı Mahmut Özel Deneme Lisesi'nde tamamladı. 1995 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 1999 yılında Metalurji Mühendisliği ünvanını aldı. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Programı'nda yüksek lisans eğitimini sürdürürken, 2001 yılında Mita Kalıp ve Döküm Sanayii A.Ş.'de çalışmaya başladı. Halen bu firmada müşteri teknik ilişkiler sorumlusu görevini sürdürmektedir.