

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIVI ALUMİNYUMA DAYANIKLI MALZEME
VE/VEYA YÜZEY İŞLEMLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Ahmet ŞENER

Eylül, 2019
İZMİR

ALUMİNYUMA DAYANIKLI MALZEME VE/VEYA YÜZEY İŞLEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Ahmet ŞENER

**Eylül, 2019
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

AHMET ŞENER, tarafından PROF. DR. ALİ BÜLENT ÖNAY yönetiminde hazırlanan “SIVI ALUMİNYUMA DAYANIKLI MALZEME VE/VEYA YÜZEY İŞLEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Ali Bülent Önay

Yönetici


Doç. Dr. Osman CULHA

Jüri Üyesi


Dr. Öğr. Uyg. Bahadır HAYALGAN

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmalarım sırasında bilgilerini benden esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali Bülent ÖNAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın büyük çoğunluğunu gerçekleştirdiğim Dokuz Eylül Üniversitesi Isıl İşlem Laboratuvarı çalışanlarından araştırma görevlisi Şükrü KAYA'ya, SEM ve EDS analizlerindeki yardımları için araştırma görevlisi Ozan Yılmaz'a, tecrübelerini esirgemeyen Emine BAŞALAN'a borlama malzemesi tedariki ve muayene yöntemleri hakkında bilgilerini benimle paylaşan Dr. Esra DOKUMACI'ya, deney düzeneğini ve borlama kaplarını üreten Erhan Deniz ÇAĞIRAL ve Yuna Makina çalışanlarına, deney düzeneğinin çizimini yapan Oğuz YÖRÜK'e, alüminyum tedariki için yardımcı olan Ali Ender ÖZER ve Emor Endüstriyel Mühendislik çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca deneylerimi yaparken yardımlarını esirgemeyen Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine teşekkür bir borç bilirim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca desteklerini üzerimden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet ŞENER

SIVI ALUMİNYUMA DAYANIKLI MALZEME VE/VEYA YÜZEY İŞLEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere farklı endüstriler için üretilen parçaların hafifliği ve korozyon dayanımı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Alüminyum parçaların hafif, korozyon dayanımı yüksek ve farklı imalat yöntemleri ile üretilebilirliği nedeniyle üretimi gün geçtikçe artmaktadır. Bununla beraber sıvı alüminyumun korozyon yapısı nedeniyle imalat sürecinde sıvı alüminyuma maruz kalan ekipmanların dayanımını azalmaktadır. Bu çalışmada sıvı ENAC-47000 serisi alaşım kullanılan sıvı alüminyum banyosunda, yüzey işlemi yapılmamış ve farklı seviyelerde borlama yapılmış 11SMnPb30+C alaşımlı çeliğin korozyon davranışları incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde ağırlık değişimi belirlenerek malzemedeki korozyon davranışı gözlemlenmiş, optik mikroskop, sertlik analizi, SEM ve EDS analizi ile elde edilen sonuçlar literatür bilgileri ışığında değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Korozyon, borlama, yüksek sıcaklık korozyonu, sıvı alüminyum

INVESTIGATION OF MATERIALS AND/OR SURFACE TREATMENTS RESISTANT TO MOLTEN ALUMINUM

ABSTRACT

The lightness and corrosion resistance of the parts produced for different industries, especially the automotive industry is becoming more and more significant day by day. The production of aluminum parts is increasing due to their lightness, high corrosion resistance and availability in different production methods. Besides, due to the corrosive nature of the liquid aluminum, it reduces the resistance of the equipment exposed to liquid aluminum during the manufacturing process. In this study, corrosion behavior of 11SMnPb30 + C alloy steel which is not surface treated and boronized at different levels was investigated in liquid aluminum, using liquid ENAC-47000 series alloy. As a result of the studies carried out, weight change was determined and the corrosion behavior of the material was observed. The results obtained by optical microscope, hardness analysis, SEM and EDS analysis were evaluated by considering the literature.

Keywords: Corrosion, boronising, high temperature corrosion, molten aluminum

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ	x
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	5
2.1 Alüminyum.....	5
2.1.1 Alüminyum üretimi	5
2.1.2 Alüminyum ve alaşım elementlerinin özellikleri	6
2.1.3 Sıvı alüminyumun korozyon mekanizması	7
2.2 Bor	12
2.2.1 Bor Elementi.....	12
2.2.2 Borun Difüzyon Mekanizması	13
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	15
3.1 Malzeme ve Ekipman.....	15
3.2 Deney Yöntemi.....	22
3.2.1 Borlama	23
3.2.2 Sıvı Alüminyuma Daldırma	24

BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR..... 26

4.1 Ağırlık Kaybı Analizleri.....	26
4.2 Mikroyapı Analizleri	27
4.2.2 Sıvı alüminyuma daldırma sonrası mikroyapılar	29
4.3 Sertlik Analizi.....	31
4.4 SEM ve EDS analizleri.....	33
4.4.1 SEM Görüntüleri	33
4.4.2 EDS Analizleri	35

BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 39

5.1 Sonuçlar.....	39
5.2 İleriye Dönük Çalışma Önerileri	40

KAYNAKLAR..... 41

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 1989-2009 Arası ton başına alüminyum fiyat grafiği	1
Şekil 1.2 1900 yılından itibaren alüminyum üretimi	2
Şekil 2.1 Alüminyum -silisyum denge diyagramı	6
Şekil 2.2 İntermetalik bileşiklerin oluşma mekanizması: (a) Katı A'nın sıvı B içinde çözünmeye başlaması, (b) A_pB_q fazının oluşması, (c) İntermetalik bileşik tabasının oluşması	7
Şekil 2.3 Fe-Al intermetalik faz yapısı	8
Şekil 2.4 Fe-Al ikili faz diyagramı.....	9
Şekil 2.5 Si içerikli ve Mg içerikli Al banyosu (a-d) ve saf alüminyum banyosu (e-h) arasındaki intermetalik faz oluşturma davranışı farkı	10
Şekil 2.6 Borlama öncesi ve sonrası yüzeyden malzeme kaybı hızı.....	11
Şekil 2.7 Demir üzerine yapılan borlama sonrası yüzeyde oluşan FeB ve Fe ₂ B fazlarının görüntüsü.....	13
Şekil 3.1 Borlama kabı	14
Şekil 3.2 Kutu fırın	15
Şekil 3.3 Kutu fırın	16
Şekil 3.4 Deney düzeneği ve kesiti	17
Şekil 3.5 SiC pota.....	17
Şekil 3.6 Hassas terazi.....	18
Şekil 3.7 Kesici	19
Şekil 3.8 Optik mikroskop	20
Şekil 3.9 Mikrovickers sertlik cihazı	21
Şekil 3.11 Deney akış şeması.....	22
Şekil 3.12. Borlamaya hazır numuneler	23
Şekil 3.13 Borlama kabı düzeni	23
Şekil 4.1 mm^3/cm^2 .saat cinsinden ağırlık kaybı analizi sonuçları	26
Şekil 4.2 Borlama işlemi yapılmamış numune	27
Şekil 4.3 Üç saat borlama yapılmış numune.....	27
Şekil 4.4 Altı saat borlama yapılmış numune	28
Şekil 4.5 Borlama yapılmadan sıvı alüminyuma daldırılmış numune	29

Şekil 4.6 Üç saat borlama yapılarak sıvı aluminyuma batırılmış numune.....	29
Şekil 4.7 Altı saat borlama yapılarak sıvı aluminyuma batırılmış numune	30
Şekil 4.8 Kesit derinliğine göre yüzeylerin sertlik değerleri.....	31
Şekil 4.9 Borlama yapılmadan sıvı aluminyuma daldırılmış numune a) 500x b)1000x c) 2000x d)5000x	32
Şekil 4.10 Üç saat borlama sonrası sıvı aluminyuma daldırılan numune BEI görüntüleri a) 100x b) 500x c) 1000x d) 5000x	33
Şekil 4.11 Altı saat borlama sonrası sıvı aluminyuma daldırılan numunede BEI ve SEI görüntüleri a) 100x b) 500x c) 1500x d) 5000x	34
Şekil 4.12 Borlama yapılmadan sıvı aluminyuma daldırılmış numune EDS alanı....	35
Şekil 4.13 Üç saat borlamanın ardından sıvı aluminyuma batırılan numune EDS alanları.....	36
Şekil 4.14 Altı saat borlamanın ardından sıvı aluminyuma batırılan numune EDS alanları.....	37

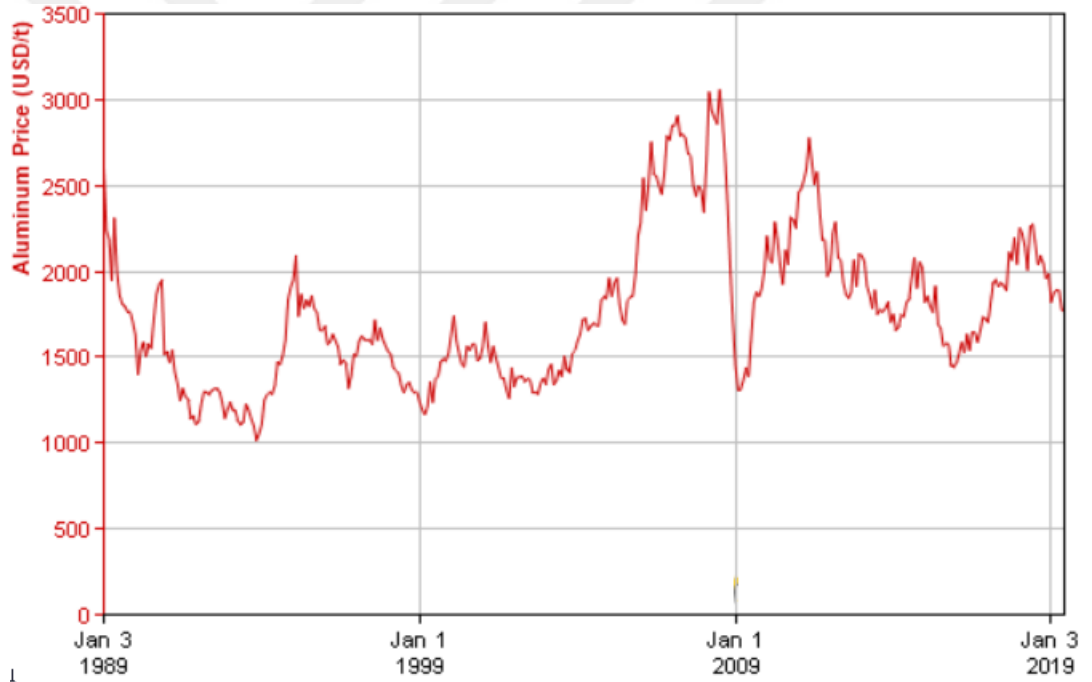
TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 11SMnPb30+C çeliği kimyasal analizi	14
Tablo 3.2 ENAC-47000 alaşımı kimyasal kompozisyonu.....	18
Tablo 4.1 Borlama yapılmadan sıvı alüminyuma daldırılmış numune kenar elementel yapı	35
Tablo 4.2 Üç saat borlamanın ardından sıvı alüminyuma daldırılmış numune elementel yapı	36
Tablo 4.3 Altı saat borlamanın ardından sıvı alüminyuma daldırılmış numune elementel yapı	37

BÖLÜM BİR

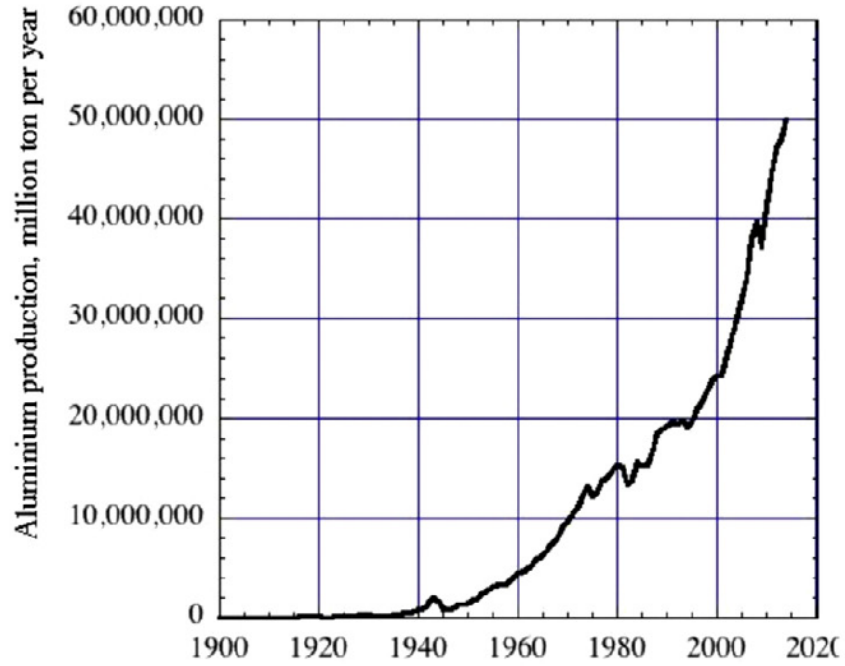
GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere farklı endüstriler için üretilen parçaların yakıt tüketimini düşürmek için hafifliği ve uzun ömrü için ise korozyon dayanımı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının çelik alaşımlarına göre özkütlece %66 daha hafif, özellikle magnezyum içeren alaşımlarında ise korozyon dayanımının daha yüksek olması (Davis, Aluminum and Aluminum Alloys, 2001) bunun yanında ton başına ortalama 2000\$'lık (bakınız şekil 1.1) fiyatı ile çeliğe daha ucuz bir alternatif olmaktadır. Bu nedenle başta otomotiv endüstrisi olmak üzere tüm endüstrilerde kullanımı artmıştır.



Şekil 1.1 1989-2009 Arası ton başına alüminyum fiyat grafiği (London Metal Exchange, 2009)

Alüminyum kullanımı 1950-2009 arası Amerika Birleşik Devletleri'nde 10 kat (Chen ve Graedel, 2012), İtalya'da 40 kat (Ciacci ve diğer., 2012), Çin'de ise sadece 1990-2009 arası 45 kat (Chen ve Shi, 2012) artmıştır. Dünya'da ise alüminyum tüketimi son 30 yılda 2,5 kat artarak 50 milyon ton'u bulmuştur (Sverdrup, Ragnarsdottir ve Koca, 2015). 1900 yılından itibaren Dünya'da alüminyum tüketimi Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2 1900 yılından itibaren alüminyum üretimi (Sverdrup, Ragnarsdottir ve Koca, 2015)

Alüminyum kullanımındaki bu artış beraberinde sıvı alüminyumun bekletilmesi, taşınması ve kalıba dökülmesi gibi üretim aşamalarını getirmektedir. Sıvı alüminyum ve alaşımları ise neredeyse tüm metal ve metal oksitlere karşı yüksek kimyasal aktiviteleri nedeniyle en agresif sıvı metallerden biridir (Zhou, Li, Shu, Sun ve Wang, 2003). Her yıl çeliğin %2'si sıvı metal kaynaklı korozyona uğramakta ve milyarlarca dolar kayba sebep olmaktadır (Chen ve diğer., 2018).

Alüminyum üretimi temelde boksit cevherinden üretilen birincil alüminyum veya hurdadan üretilen ikincil alüminyum olarak ikiye ayrılabilir. Her iki süreçte de alüminyum ergitilmekte ve alaşımlanarak ingot üretimine hazır hale getirilmektedir. Sıvı alüminyumun alaşımlanması ve dökülmesi sırasında pota, kalıp ve taşıyıcı ekipmanlar sıvı alüminyuma maruz kalmaktadırlar. Bu süre içinde de alüminyumun korozif etkisi nedeniyle zarar görmektedirler.

Bununla beraber alüminyum parçaların üretilmesi aşamasında birincil veya ikincil alüminyum olması farketmeksizin farklı endüstriler için farklı üretim yöntemleri

kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin içinde yüksek basınçlı döküm, alçak basınçlı döküm, gravite döküm, ekstrüzyon, soğuk şekillendirme ve haddeleme sayılabilir.

Aluminyum parçaların üretim yöntemleri için özellikle yüksek basınçlı dökümde sıvı alüminyumya yüksek hız ve basınçta maruz kalan kalıp çelikleri sıvı alüminyumdan en çok etkilenen yüzeylerdir. Malzeme kaybı ve ömür kısılmasının yanında, yüksek basınçlı döküm kalıplarında oluşacak pim kırılması, yüzey çatlakları, parça kopması gibi sorunlar doğrudan üretilen ürünün kalitesini etkilemekte, üretim duruşlarına sebep olmakta ve üretim maliyetlerini arttırmaktadır. En çok etkilenen ekipmanları potalar, pistonlar, kovanlar, kalıplar ve kalıp parçaları oluşturmaktadır (Xiao, Chen ve Liu, 2012).

Yüksek basınçlı dökümde sıvı alüminyumun korozyif etkisinden korunmak için halihazırda yüksek sıcaklık takım çelikleri kullanılmaktadır. Fakat yüksek alaşımlı olmaları, ısıtılma işlem ve kaplama gibi ek işlemlerden geçmeleri nedeniyle bu çelikler maliyetli bir seçim olmaktadır. Yüksek basınçlı dökümde kullanılan H13 çeliğinin yaklaşık maliyeti 12-18\$/kg'dır O.T. Koruk (Kişisel iletişim, 26.06.2019).

Sıvı alüminyuma karşı korozyon direncini arttırmak için bir yöntem olarak borlama yapılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Borlama hem sadece korozyon dayanımının gerekli olduğu yüzeye uygulanabildiği için yüksek alaşımlı bir çeliğe olan ihtiyacı oradan kaldırması, hem yüzey sertliğini arttırması hem de korozyon dayanımını arttırmak için ucuz ve etkili bir alternatif olması nedeniyle potansiyeli yüksek bir uygulamadır. 2005 yılında (Lou, Akselsen, Onsøien, Solberg ve Berget, 2005) yapılan çalışmada borlama sonrası çeliklerin sıvı alüminyum içindeki korozyon davranışında olumlu gelişmeler olduğu gözlemlenmiş ve ağırlık kaybı azaltılabilmektedir.

Bu nedenle bu çalışmada sıvı alüminyumun korozyon mekanizması incelenmiş, düşük maliyeti nedeniyle (1\$/kg) pim üretiminde kullanılan 11SMnPb30+C alaşımlı otomat çeliği farklı sürelerde borlama yapılarak sıvı alüminyum içindeki korozyon davranışı incelenmiştir, borlama süresinin korozyon dayanımına etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

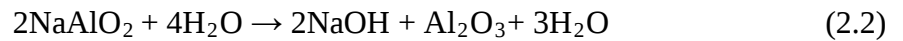
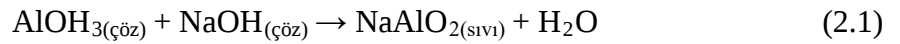
LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Tezin bu bölümünde alüminyum üretimi ve özellikleri bunun yanında sıvı alüminyumun korozyon mekanizmasının işleyişi hakkında bilgiler ve literatürdeki sıvı alüminyumun korozyon davranışına ve korozyon etkisini azaltmaya yönelik çalışmalardan örnekler verilmiştir. Bununla beraber bor madeni ve üretim yöntemlerinin yanı sıra borlamanın çelik yüzeyinde yarattığı değişiklikler, korozyon davranışına etkisi gibi konularda yapılan çalışmalardan örneklere yer verilmiştir.

2.1 Alüminyum

2.1.1 Alüminyum üretimi

Alüminyum doğada ikinci en çok bulunan metalik elementtir. %27,5 oranla bulunan silisyumun ardından %8 oranla yer kabuğunda bulunur. Fakat yüksek afinitesi nedeniyle yer kabuğunda her zaman oksit halinde bulunur (Sverdlin, 2000). Bu nedenle metal halinde kullanılabilmesi için boksit cevherinden indirgenmesi gerekir. Bu indirgeme işlemi için Bayer Prosesi kullanılır. Bayer Prosesinde alüminyum hidroksit sırasıyla aşağıdaki kimyasal işlemlerden geçerek metalik alüminyum elde edilir (Sverdlin, 2000). Bu prosesle elde edilen alüminyum cevherden üretildiği için birincil alüminyum olarak adlandırılır. Türkiye’de üretimi Seydişehir Eti Alüminyum Fabrikası’nda vardır.



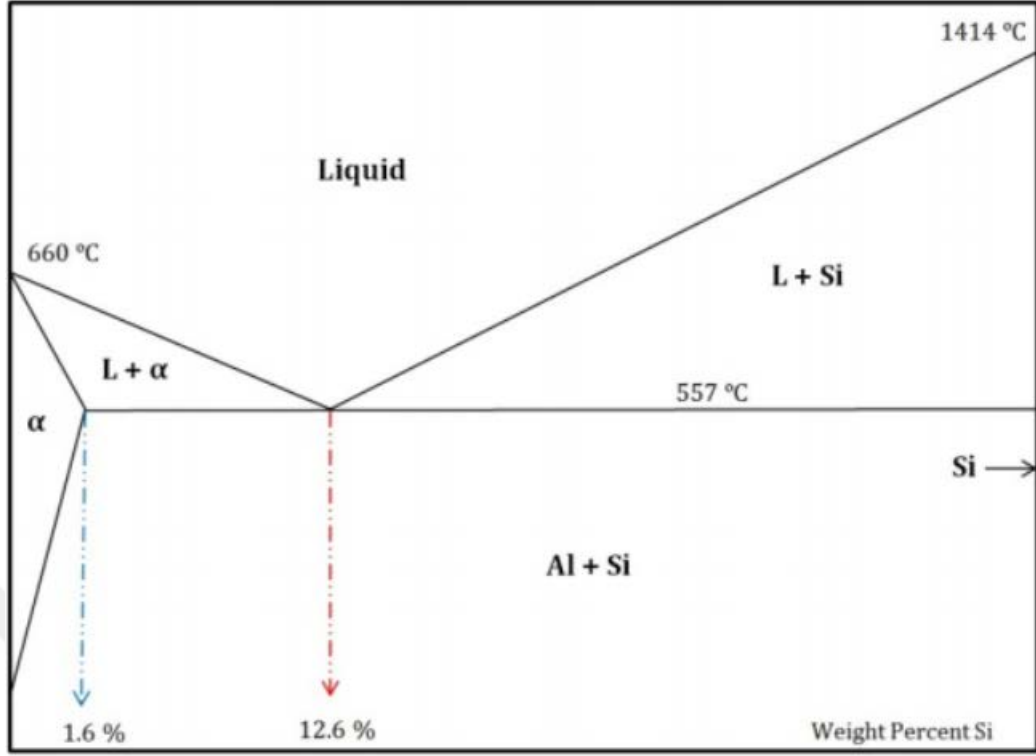
Bu şekilde üretilen metalik alüminyum daha sonra istenen standartlarda alaşımlanarak ingotlara dökülür ve kullanıma hazır hale getirilir.

İkincil alüminyum üretimi için ise en az bir kere kullanılmış alüminyum hurdası ertigitilip alaşımlama yapılır ve kullanılmaya hazır hale getirilir.

2.1.2 Alüminyum ve alaşım elementlerinin özellikleri

Alüminyumun özkütlesi 2,71 g/cm³'tür. Alüminyum yüksek afinitesi nedeniyle yüzeyinde sürekli olarak Al₂O₃ tabakası bulundurur ve bu sayede korozyona karşı doğal bir koruma kalkanına sahiptir. Mekanik özellikleri alaşımlama ve yaşlandırma ile yükseltilebilir. Bunlarla beraber erime sıcaklığı saf alüminyumda 660°C'dir. Alaşımlama yapıldığında bu sıcaklık daha da aşağıya inebilmektedir. Döküm sıcaklığı pek çok alüminyum alaşımları için 650°C ila 720°C arasındadır ki bu sıcaklıklar alüminyum döküm sıcaklığı minimum 1200°C olan dökme demir veya 1500°C olan ortalama bir çeliğe göre çok daha avantajlı hale getirmektedir. Bu özellikler alüminyum yapısal parçaların mukavemet beklentilerini karşıladığı her alanda kullanmak için ideal bir metal haline getirmektedir.

Alaşım elementleri olarak silisyum alüminyum'un akışkanlığını arttırırken ergime sıcaklığını düşürür. (Tiryakioğlu ve Stanley, 2000) Alüminyum silisyum denge diyagramı şekil 2.1'de görülebilir. Diyagramda görülebileceği üzere %12,6 silisyum ötektik noktasını oluşturmaktadır. Bu nedenle hem ergitme için gerekli enerji maliyetini azaltmak hem de döküm kolaylığı sağlamak için dökümde en çok kullanılan alüminyum alaşımları yüksek silisyum içeren alaşımlardır.



Şekil 2.1 Alüminyum - silisyum denge diyagramı

Silisyumun yanında işlenebilirliği arttırmak için bakır (Tiryakioğlu ve Stanley, 2000), korozyon dayanımını arttırmak için magnezyum (Davis, Aluminum and Aluminum Alloys, 2001), çelik kalıba döküm sırasında yapışmayı azaltmak için demir en sık kullanılan alaşımlandırma elementleri arasındadır.

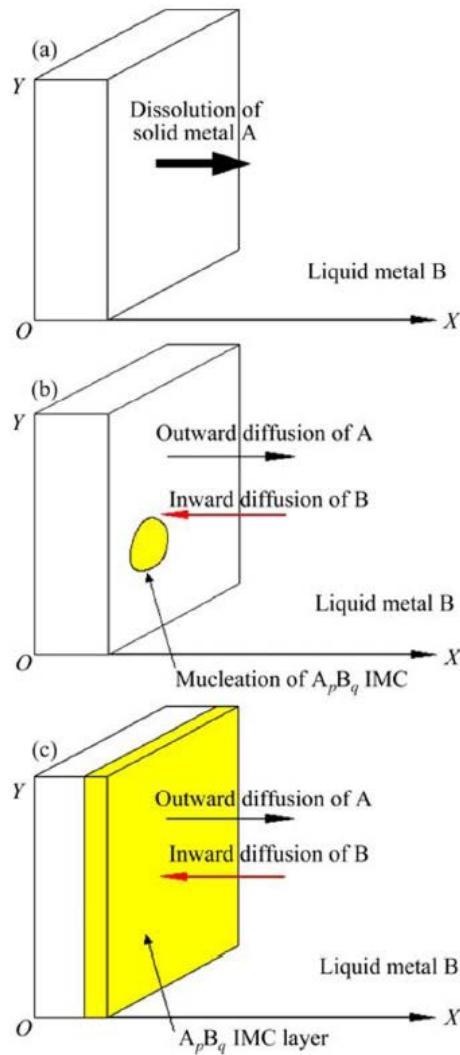
2.1.3 Sıvı alüminyumun korozyon mekanizması

Korozyon en genel tanımıyla doğal bir süreçtir ve tüm doğal süreçler gibi en düşük enerji seviyesine doğru hareket eder. Örneğin demir ve oksijen en düşük enerji seviyesine ulaşmak için birleşir ve bunun sonunda çelik korozyona uğramış olur (Davis, 2000). Aynı kaynaktan daha özel bir tanım yapmak gerekirse korozyon, bir malzemenin -genellikle bir metalin- çevresiyle girdiği ve özelliklerinde bozulmaya sebep olan kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyondur.

Bununla beraber sıvı alüminyumun içindeki çeliğin korozyonu ise demirin sıvı alüminyumun içindeki difüzyonu ve çözünmesinin sonucudur. Bu çözünmenin itici

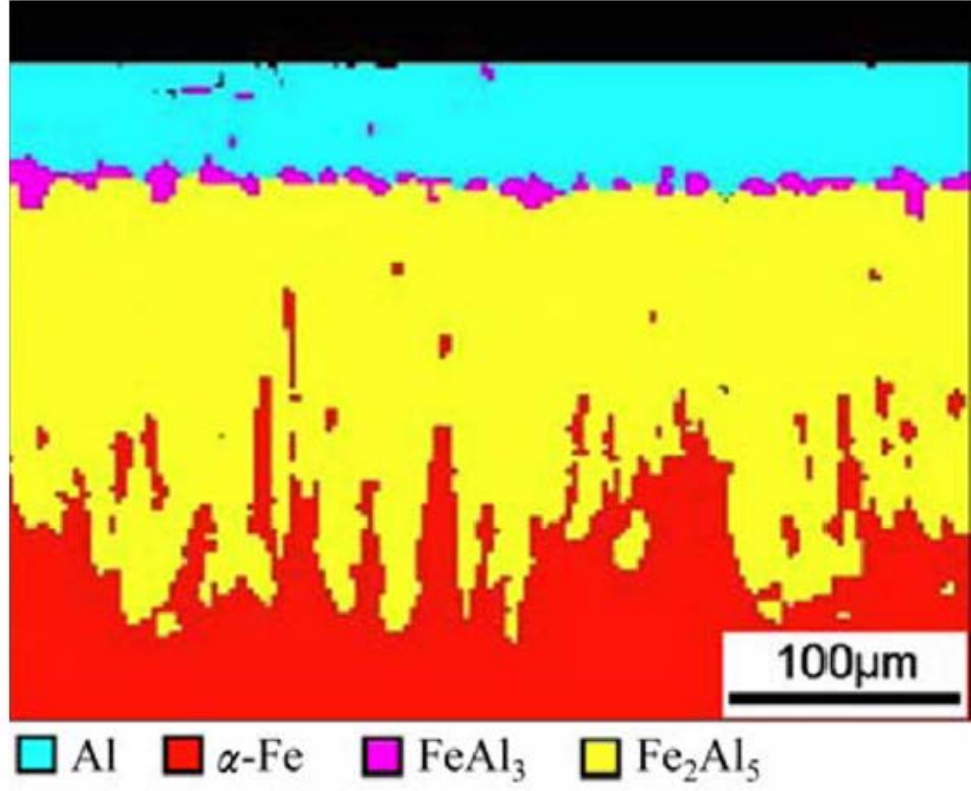
gücü matriks içindeki demirin ve sıvı banyonun içindeki alüminyumun kimyasal potansiyel farkıdır (Balloy, Tissier, Giorgi ve Marc, 2010).

Demir bazlı malzemelerin sıvı alüminyum içindeki korozyonu temelde sıvı alüminyum tarafından ıslatılmasıyla demirin çözünmesi ve alüminyumun demir substrata difüze olmasıyla oluşur. Difüzyon major Fe_2Al_5 (η fazı) ve minor FeAl_3 (θ fazı) intermetalik bileşiklerinin oluşmasını sağlar (Zhang ve Chen, 2014). Intermetalik bileşiklerin oluşma mekanizması şekil 2.2’de görülebilir.

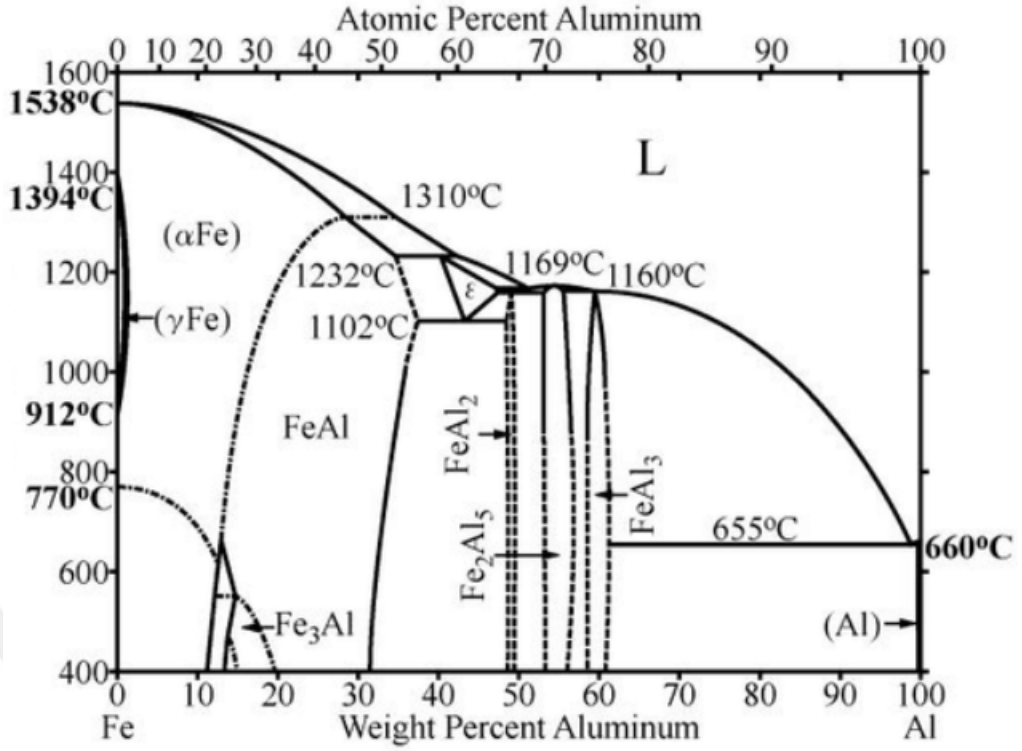


Şekil 2.2 İntermetalik bileşiklerin oluşma mekanizması: (a) Katı A’nın sıvı B içinde çözünmeye başlaması, (b) A_pB_q fazının oluşması, (c) İntermetalik bileşik tabasının oluşması (Zhang ve Chen, 2014)

Şekil 2.3.'de ise intermetalik fazlar görülebilir. En dışta alüminyumca zengin FeAl_3 fazı oluşurken demir substrata doğru ilerledikçe Fe_2Al_5 bulunmaktadır. Şekil 2.4'te görülen Fe-Al ikili faz diyagramında ise Fe-Al'un oluşturduğu tüm fazlar görülebilmektedir.



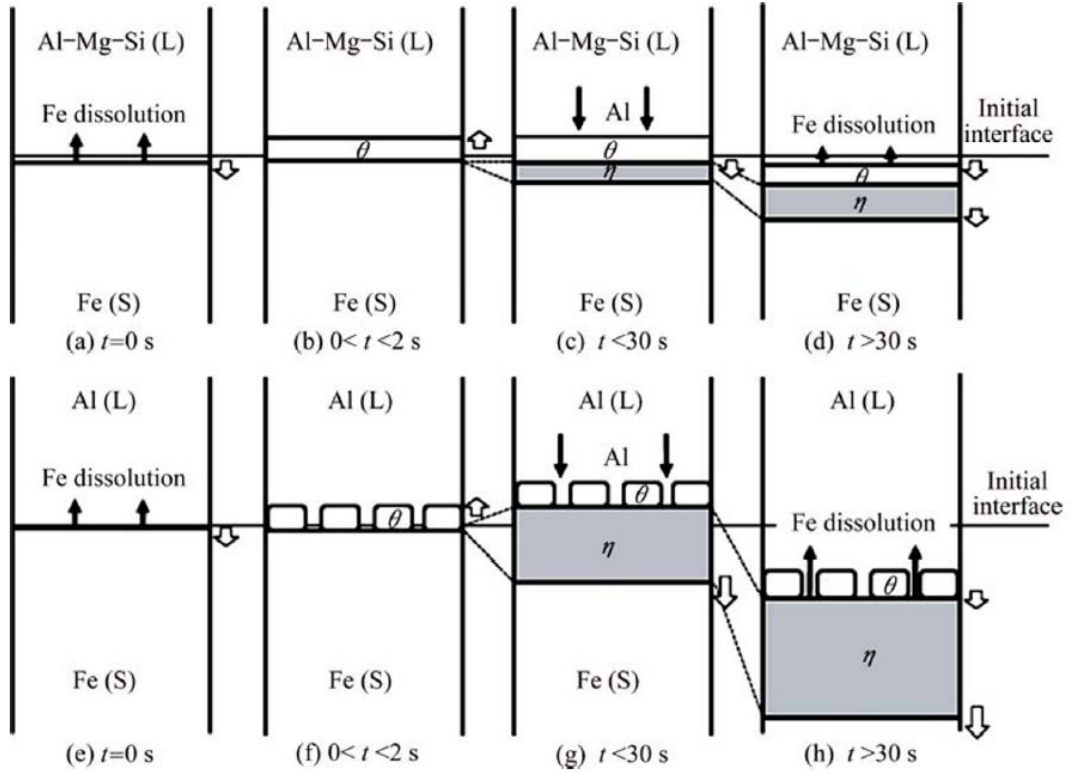
Şekil 2.3 Fe-Al intermetalik faz yapısı (Cheng ve Wang, 2009)



Şekil 2.4 Fe-Al ikili faz diyagramı (Massalski, 1990)

Intermetalik fazların oluşumu birbirinden farklı metallerin yüksek sıcaklıkta temasta olmaları ile oluşur. Yeni fazların oluşumu 3 faktöre bağlıdır; 1) Kimyasal potansiyel farkı 2) inter-difüzyon prosesinin başlangıcındaki çekirdeklenme şartları, 3) Elementlerin mobiliteleri (Zhang ve Chen, 2014). Bu şartları göz önünde bulundurduğumuzda çeliğin içine alüminyum ekleyerek kimyasal potansiyel farkı düşürülebilir veya difüzyona engel olmak için çeşitli zorluklar yaratarak örneğin grafit lameller, ötektoid veya dupleks yapılar ile korozyon hızı azaltılabildiği çeşitli kaynaklarca doğrulanmıştır. (Kim, Kim ve Kang, 2014), (Lou ve diğer., 2005), (Awan ve Hasan, 2008).

Sıvı alüminyumun alaşımı da korozyon mekanizması üzerinde etkilidir. Intermetalik bileşiklerin oluşumu alaşım elementlerinden (Si, Cr, Cu ve C) etkilenir. Bunların arasında en güçlü etkiyi Si yapar. Si alüminyum banyosunun içinde olduğunda Fe_2Al_5 fazının oluşum hızını azaltır (Lin ve Wang, 2010). Bu mekanizma şekil 2.5'te görülebilir.

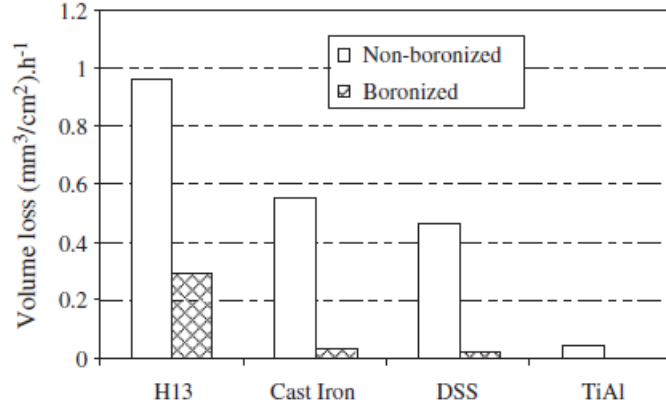


Şekil 2.5 Si içerikli ve Mg içerikli Al banyosu (a-d) ve saf alüminyum banyosu (e-h) arasındaki intermetalik faz oluşturma davranışı farkı (Takata, Nishimoto, Kobayashi ve Takeyama, 2014)

Alüminyumun yarattığı korozyonu azaltmak için ise pek çok adım atılmıştır. Bunlardan bazıları; çeliğe faydalı elementler ekleyerek veya çelik yüzeyine seramik kaplama yapmak, örneğin karbonun çeliğe eklenmesiyle dökme demirdeki carbon grafit halde bulunur ve sıvı alüminyum tarafından ısıtılması zorlaşır (Balloy ve diğer., 2010). Silikon Fe_2Al_5 içindeki boşlukları doldurarak Fe-Al intermetalik bileşiğinin ilerlemesini engeller (Yin, Zhao, Liu, Han ve Li, 2013). Bor ise çelik yüzeyinde engelleyici bir M_2B ($M=Fe, Cr, Mo$) borit tabakası oluşturarak korozyona karşı bir dayanım sağlar (Tsipis, Triantafyllidis, Kiplagat ve Psillaki, 1998).

Bor ile çeliğin sıvı alüminyum içindeki korozyon dayanımını artırma üzerine çalışma yapan (Lou ve diğer., 2005) 22Cr – 5 Ni Duplex paslanmaz çelik ve H13 takım çeliği $1025^{\circ}C$ 'de 5 saat, dökme demir ise $850^{\circ}C$ 'de 5 saat süreyle borlamışlardır. Bu işlem sonunda dış yüzeyde oluşan FeB ve Fe_2B tabakası sıvı alüminyumun korozyonuna karşı bir koruma sağlamıştır. Sıvı alüminyum içinde

saatlik hacim kayıpları ise sırası ile 20, 3 ve 16 kat iyileştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları şekil 2.6.'te görülebilir.



Şekil 2.6 Borlama öncesi ve sonrası yüzeyden malzeme kaybı hızı (Lou ve diğer., 2005)

Yakın tarihli bir çalışmada ise yine boritlerin M_2B ($M=Fe, Cr, Mo$) sıvı alüminyumun çelik substrata difüzyonunu zorlaştıracak bir tabaka oluşturduğu ve korozyonu yavaşlattığı kanıtlanmıştır (Zhang ve diğer., 2017)

Yine de tam anlamıyla olumlu bir sonuç almak oldukça zordur. Hangi element veya yöntemin kullanıldığından bağımsız olarak (ıslanmaz grafit, engelleyici borit tabakası, iyileştirilmiş çelik yüzeyi) çelik ile sıvı alüminyum birinden tamamen ayıramaz. Bu nedenle korozyon meydana gelir (Zhongdi ve diğer., 2019).

2.2 Bor

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılacak yöntem olarak ülkemizin zengin kaynaklarından olan bor kullanılmıştır. Bu nedenle bu kısımda bor ve difüzyon mekanizması hakkında da bilgiler verilecektir.

2.2.1 Bor Elementi

Bor, atom numarası 5 ve kimyasal sembolü B olan kimyasal elementtir ve bir yarı metaldir. Elementel bor doğada bulunmaz. Endüstride yüksek saflıkta bor zorlukla

elde edilebilir çünkü bor, karbon ve başka elementlerle bileşikler oluşturur Dünya'nın yerkabuğundaki bor yüzdesinin 0,001 – 0,0003 civarında olduğu varsayılmaktadır. Borun temel cevherleri; kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve uleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) gibi boratlardır (Pekin, 1992). Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren doğal bileşiklerdir. Türkiye'de yaygın olarak bulunan bor mineralleri ise; tinkal, kolemanit ve üleksittir. Bu mineralleri içeren cevherlere uygulanan fiziksel zenginleştirme işlemleri sonucunda konsantre bor ürünleri elde edilmektedir (T.C. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2019).

2.2.2. Borun Difüzyon Mekanizması

Difüzyon, geçişme veya yayılma olarak da bilinir, maddelerin çok yoğun ortamdan, az yoğun ortama doğru kendiliğinden yayılmasıdır. Fiziksel kimyada ise moleküllerin kinetik enerjilerine bağlı olarak rastgele hareketlerine denir. Difüzyon atomik hareket ile kütle transferi olarak da tanımlanabilir (Callister ve Rethwisch, 1985). Termodinamiğin 2. Yasası gereği sistemler entropinin artışı yönünde hareket eder bu da difüzyon mekanizmasının açıklamaktadır. Atomların çok yoğun ortamdan az yoğun ortama doğru hareketi termodinamiğin 2. Yasası gereği olur.

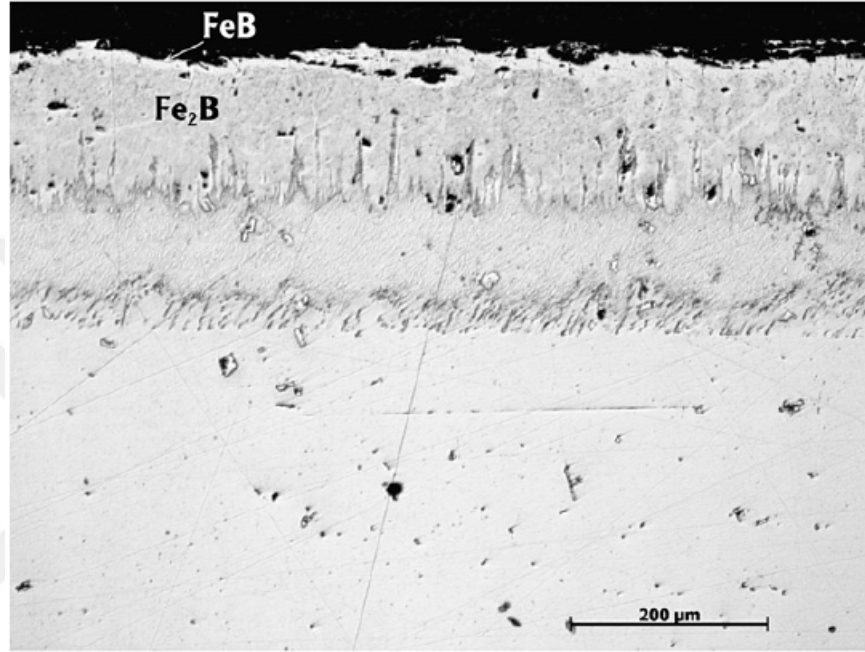
Difüzyon mekanizması birinci ve ikinci Fick yasaları ile açıklanmaktadır. Adolf Fick (Fick, 1855) partiküllerin (atomlar, moleküller, iyonlar) akılarının tek boyutlu bir sistemde kontrantrasyon gradyenine bağlı olarak oluştuğunu belirtmiştir. Akı denklem (2.4) ile açıklanabilir (Paul, Laurila, Vuorinen ve Divinski, 3- Fick's Laws of Diffusion, 2014).

$$J = \frac{dm}{dtA} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.4)$$

İkinci Fick yasası ise birinci yasanın kütleyle çevrilmesi ile elde edilir (2.5)

$$\frac{\partial c_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_B \frac{\partial c_B}{\partial x} \right) \quad (2.5)$$

Borun yüksek sıcaklıkta çelik yüzeyine difüzyonu sonunda dış katmanda sırasıyla öncelikle borca zengin FeB ve ardından Fe₂B oluştuğu literatür çalışmalarında görülmüştür (Dokumaci, Ozkan ve Onay, 2013; Lou ve diğer., 2005; Gencer, Tarakci ve Calik, 2008). Oluşan bu tabakaların optik mikroskop görüntüsü şekil 2.7’de görülebilir.



Şekil 2.7 Demir üzerine yapılan borlama sonrası yüzeyde oluşan FeB ve Fe₂B fazlarının görüntüsü (Gencer ve diğer., 2008)

Bu tez kapsamında yapılan borlama çalışmasında borlama yapılmayan ve farklı sürelerde borlama yapılan numunelerin sıvı alüminyumun yarattığı korozyona karşı davranışları incelenmiştir. Bu sayede hem borlamanın sıvı alüminyumun yarattığı korozyona karşı direnç hem de borlama süresinin bu direnç üzerindeki bir etkisi olup olmadığı sorularına cevap aranmıştır.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzeme ve Ekipman

Çalışmayı yapmak için borlama yapılacak çelik olarak pim üretiminde kullanılan 11SMnPb30+C otomat çeliği kullanılmıştır. 18mm çapında 70mm uzunluğundaki numuneler kullanılmıştır. Testlere başlanmadan önce etil alkol kullanılarak temizlenmiştir.

Tablo 3.1 11SMnPb30+C çeliği kimyasal analizi

C	Si	Mn	P	S	Pb
0,070%	0,011%	1,150%	0,072%	0,321%	0,291%

Borlama için Ekabor II (90% SiC, 5% B₄C and 5% KBF) tozu, borlama yapmak için ise özel olarak 1040 çeliğinden yaptırılan borlama kabı ve 1200 °C'ye ulaşabilen kutu fırın (bakınız şekil 3.2) kullanıştır.



Şekil 3.1 Borlama Kabı (Kişisel arşiv, 2019)

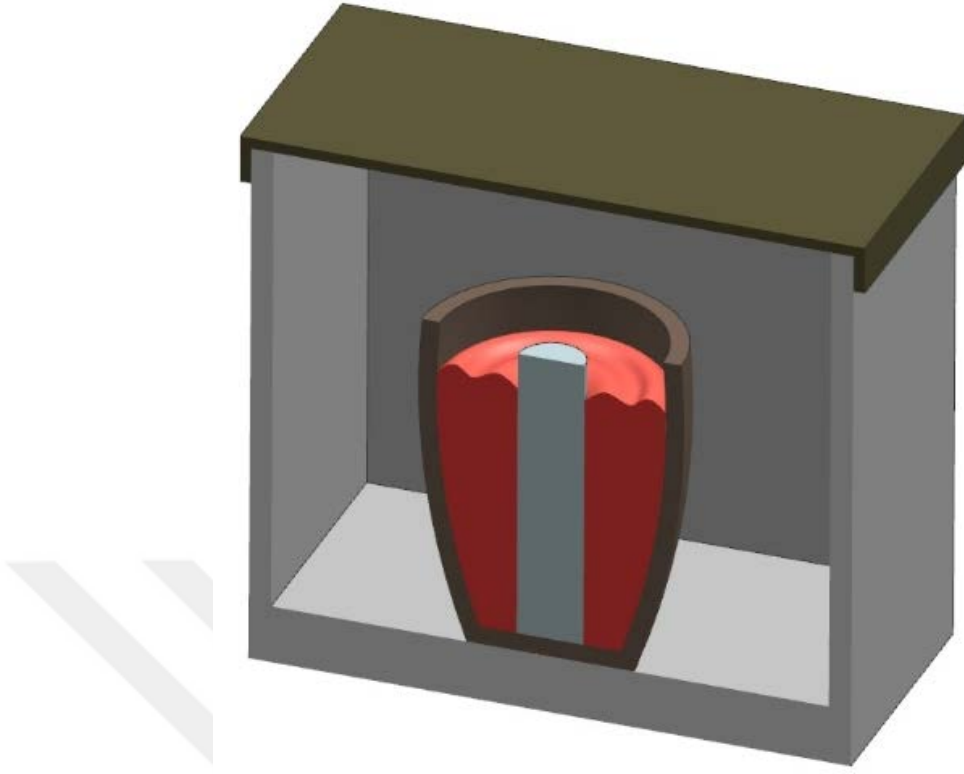


Şekil 3.2 Kutu fırın (Kişisel arşiv, 2019)

Borlanmış numunelerin sıvı alüminyuma daldırma testlerini yapmak için 1000°C'ye ulaşabilen kutu fırın (bakınız şekil 3.3) kullanılmış ve bu fırın ölçülerinde özel olarak yaptırılan deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneği içinde kullanılan 25 cc hacimde SiC kuyumcu potasıdır. Kullanılan alüminyum alaşımı ENAC-47000'dir.



Şekil 3.3 Kutu fırın (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 3.4 Deney düzeneği ve kesiti (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 3.5 SiC pota (Kişisel arşiv, 2019)

Tablo 3.2 ENAC-47000 alaşımı kimyasal kompozisyonu

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
12,00%	0,70%	0,90%	0,30%	0,35%	0,10%	0,30%	0,55%	0,20%	0,10%	0,15%

Sıvı alüminyuma daldırma testlerinden çıkan numunelerin temizliği için NaOH çözeltisi kullanılmış, temizlenen numunelerin tartımı için hassas terazi (AND GR-200 (14227086)) kullanılmıştır.



şekil 3.6 Hassas terazi (Kişisel arşiv, 2019)

Numunelerin kesilmesi için Struers Labatom-5 kesici kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Kesici (Kişisel arşiv, 2019)

Kesilen numuneler numune hazırlama işlemine tabi tutulduktan sonra %2'lik Nital çözeltisiyle dağlanmıştır. Muayene için optik mikroskop (Olympus GX41F (3E40503)) kullanılmıştır.



Şekil 3.8 Optik mikroskop (Kişisel arşiv, 2019)

Sertlik testleri mikrovickers test cihazında (HVM-2 E (344-04109-22)) yapılmıştır.

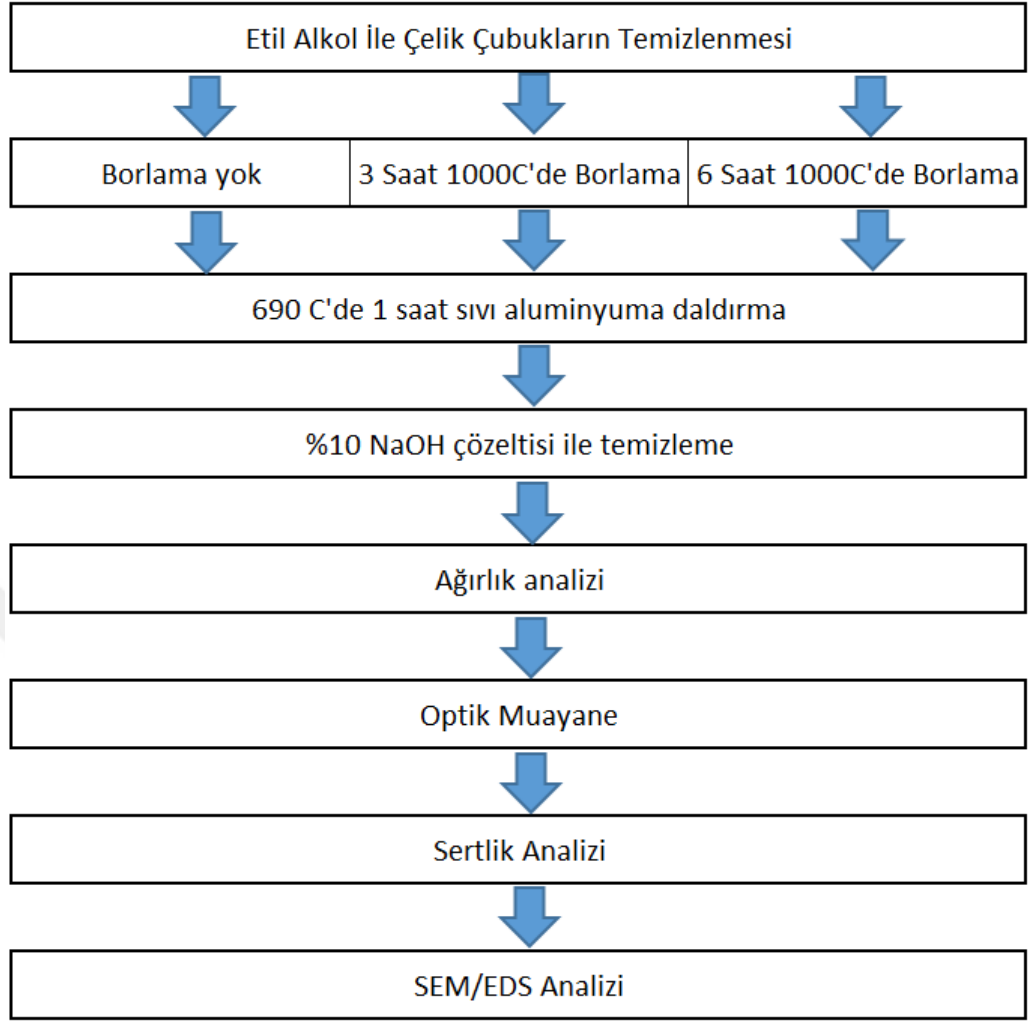


Şekil 3.9 Mikrovickers sertlik cihazı (Kişisel arşiv, 2019)

Numuneler son olarak SEM ve EDS testlerine tabi tutulmuştur.

3.2 Deney Yöntemi

Deneyde 2 farklı sürede borlanmış numunelerin sıvı alüminyum içindeki korozyon ve mikroyapı davranışlarını gözlemlemek için 3 ve 6 saat 1000°C’de’de borlama yapılmıştır. Kontrol numunesi olması amacıyla deneylere bir adet de borlama görmemiş numune katılmıştır.



Şekil 3.11 Deney akış şeması

3.2.1 Borlama

Borlama öncesi numuneler etil alkol ile temizlenerek üzerlerinde yağ ve tozdan arındırılmıştır. Tek seferde 3 adet numune alan borlama kabında birbirlerine değmeyecek şekilde dizilmiş ve Ekabor II tozuyla kap tamamen doldurulmuştur. 3 numunenin tek seferde borlanmasının sebebi 1 numunenin borlama sonrası mikroyapısına bakılması, bir numunenin borlama sonrası sıvı alüminyum testine tabi tutulması bir numunenin ise şahit numune olarak saklanmasıdır.



Şekil 3.12. Borlamaya hazır numuneler (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 3.13 Borlama kabı düzeni (Kişisel arşiv, 2019)

Borlama işlemi 1000°C 'de 3 ve 1000°C 'de 6 saat olmak üzere iki kere yapılmıştır. Borlamanın sonunda 3 adet 3 saat, 3 adet de 6 saat borlanmış numune elde edilmiştir.

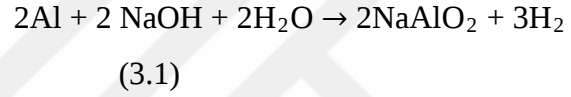
3.2.2 Sıvı Alüminyuma Daldırma

Sıvı alüminyuma daldırma işlemi için kullanılan düzeneğe önceden kesilmiş ENAC-47000 alaşımlı külçe parçaları konup 690°C 'de eritildikten sonra sırasıyla

borlama yapılmamış, 3 saat borlama yapılmış ve 6 saat borlama yapılmış numuneler 1 saat boyunca tutulmuştur.

3.2.3 Temizlik ve testlere hazırlık

Sıvı alüminyumdan çıkartılan numunelerin hassas terazide yapılacak tartımlarının sonucunu etkilememesi için %10'luk NaOH çözeltisi için 8 saat boyunca bekletilen numunelerin üzerlerindeki fazladan alüminyum temizlenmiştir. Sodyumhidroksit ve Alüminyum birleşerek sodyum alüminat oluşturmakta bu sayede çeliğin üzerinden ayrılmaktadır.



Metalografi muayenesi için numuneler kesme, maksimum 1200'lük zımpara kullanılarak zımparalama, parlatma ve %2'lik nital çözeltisinde dağlama işlemlerinden geçirilmiştir.

3.2.4 Testler

Hazırlanan numuneler sırasıyla ağırlık analizi, optik muayene, sertlik analizi yapılmış, SEM ile görüntülenmiş ve EDS analizlerine tabi tutulmuştur.

BÖLÜM DÖRT

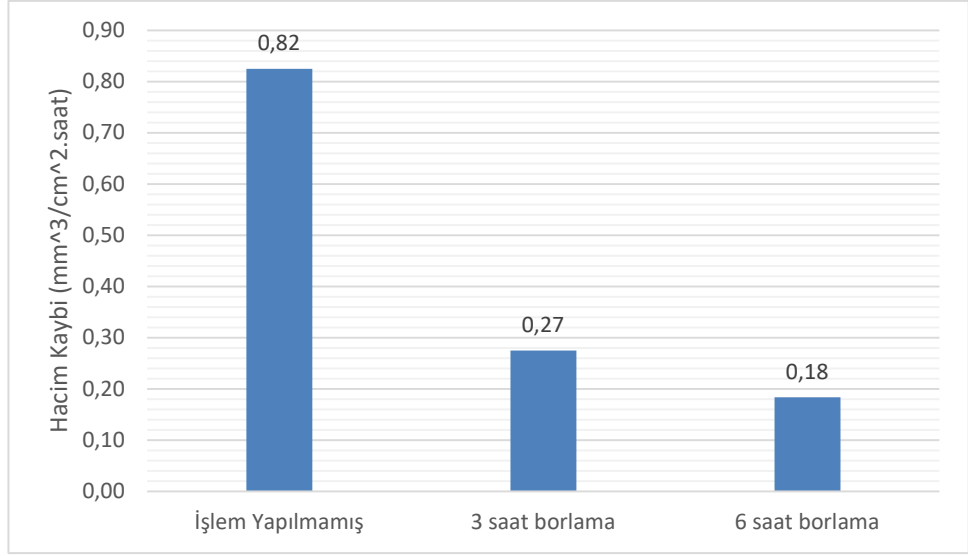
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

11SMnPb30+C çeliğinden hazırlanan (18mm çap ve 70mm uzunlukta silindirik) numuneler farklı sürelerde borlandıktan sonra korozyon davranışlarını incelemek için sıvı alüminyuma daldırılarak bir saat boyunca bekletilmiştir. Bu bağlamda tezin bu bölümünde elde edilen numunelerin öncelikle ağırlık kaybı analiz sonuçları incelenecektir. Sonrasında mikro yapı görüntüleri ve sertlik analizleri ile borlama derinliği hakkında elde edilen bulgular paylaşılacaktır. Son olarak SEM ve EDS analizleri incelenecektir.

4.1 Ağırlık Kaybı Analizleri

Üç farklı numune (borlama yapılmamış, 3 saat borlama yapılmış ve 6 saat borlama yapılmış) sıvı alüminyuma daldırılan numuneler daldırma işlemi öncesinde temizlenmiş üzerlerindeki kalıntılardan arındırılmıştır. Sonrasında sıvı alüminyum testi öncesinde hassas terazide ağırlıkları belirlenmiştir. Daldırma işlemi bittikten sonra sıvı alüminyumla temas eden yüzey alanı cm^2 cinsinden hesaplanmıştır. Son olarak %10'luk NaOH çözeltisinde temizlenmiştir ve tartımları yapılmıştır. Yapılan tartımlar literatür'le karşılaştırma yapabilmek için $\text{mm}^3/\text{cm}^2.\text{saat}$ cinsine çevrilmiştir. Tartım sonuçları şekil 4.1'deki gibidir.

Grafikte görüleceği gibi borlama işlemi yapılmamış numunede ağırlık kaybı hızı $0,82 \text{ mm}^3/\text{cm}^2.\text{saat}$ iken 3 ve 6 saat borlama yapılmış numunelerde ağırlık kaybı hızı sırasıyla $0,27$ ve $0,18 \text{ mm}^3/\text{cm}^2.\text{saat}$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar 2005 yılında yapılan (Lou ve diğer., 2005) çalışmayı destekler niteliktedir.



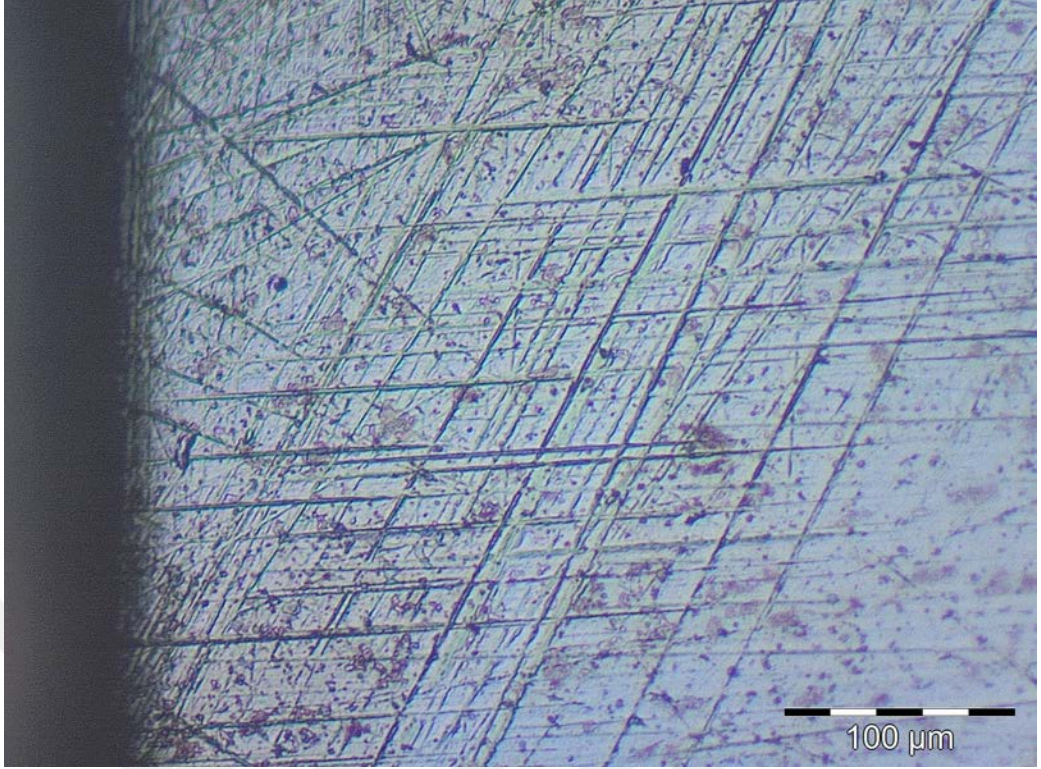
Şekil 4.1 mm³/cm².saat cinsinden ağırlık kaybı analizi sonuçları

4.2 Mikroyapı Analizleri

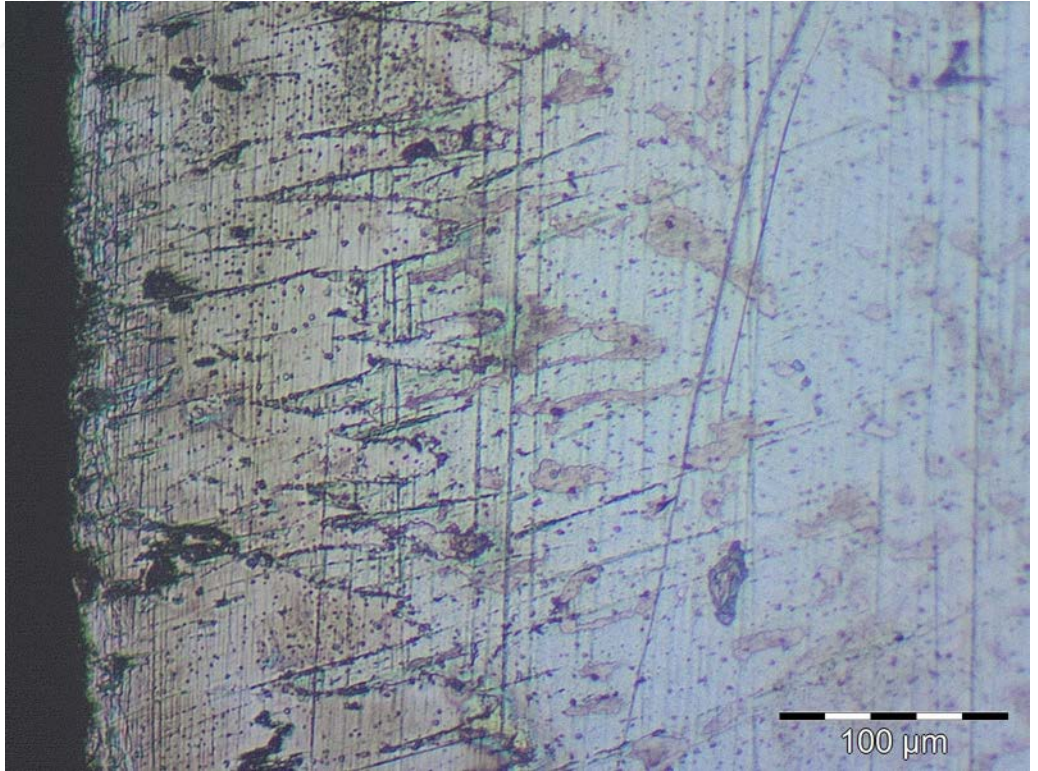
Çalışmanın bu aşamasında borlama ve alüminyumlama işlemleri öncesi ve sonrasında alınan mikro yapı görüntüleri incelenmiştir.

4.2.1 Sıvı Alüminyuma daldırma öncesi mikroyapılar

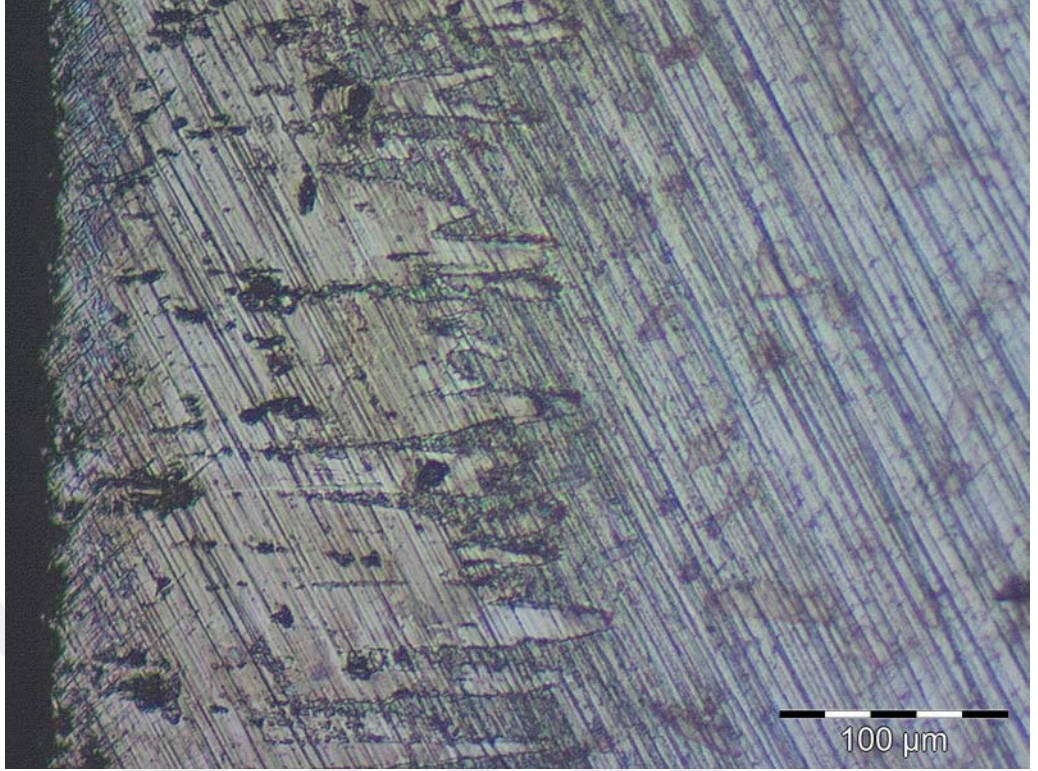
Alüminyuma daldırma öncesindeki mikroyapı resimleri Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te görülebilir. Resimlere göre borlama derinliği 3 saat ve 6 saat'te sırasıyla 190 ve 250 mikrometre civarındadır. Bu derinlikler bir sonraki bölümde yer alan sertlik testleri ile de doğrulanmıştır.



Şekil 4.2 Borlama işlemi yapılmamış numune



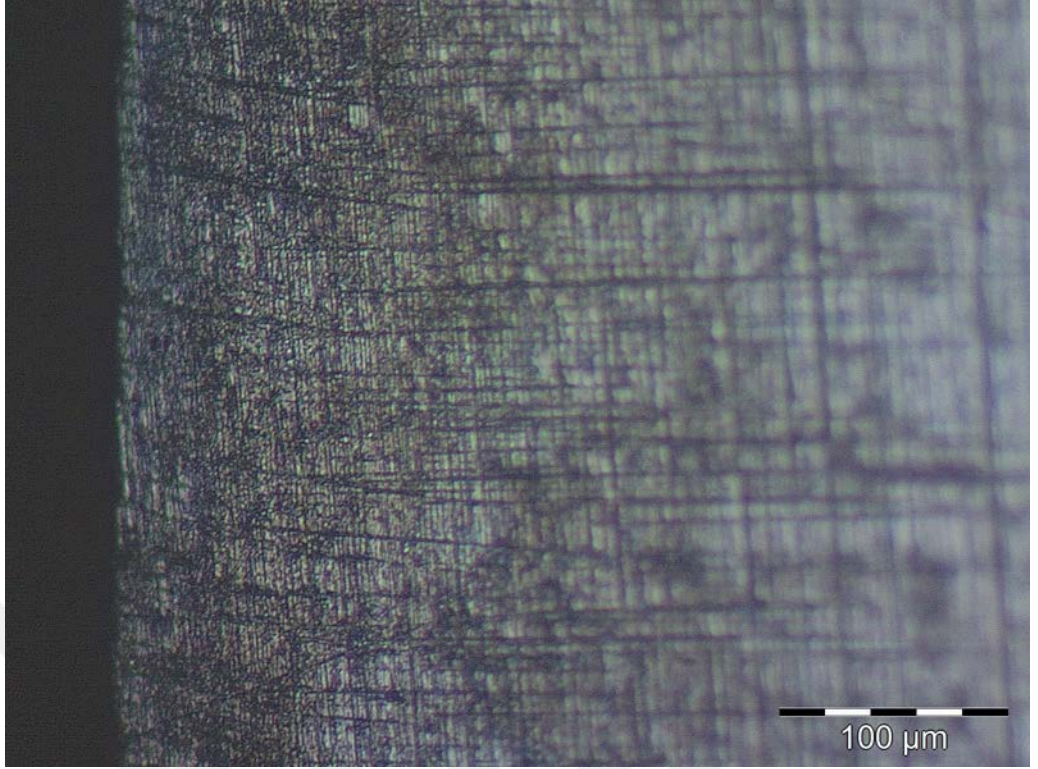
Şekil 4.3 Üç saat borlama yapılmış numune



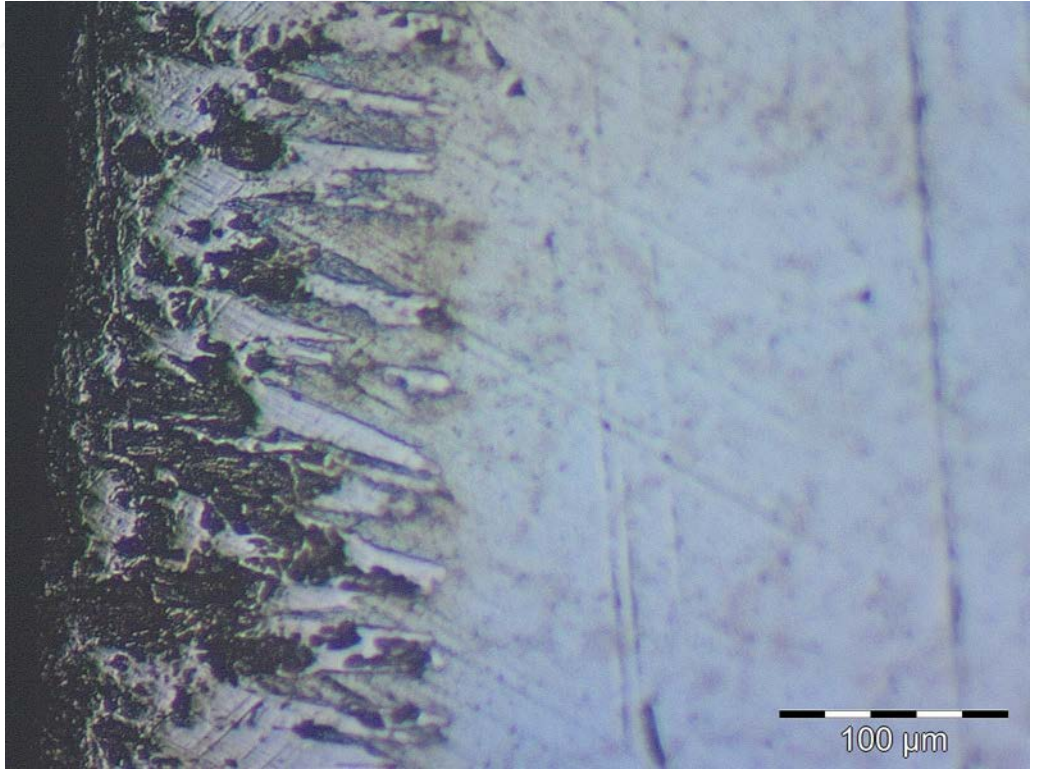
Şekil 4.4 Altı saat borlama yapılmış numune

4.2.2 Sıvı aluminyuma daldırma sonrası mikroyapılar

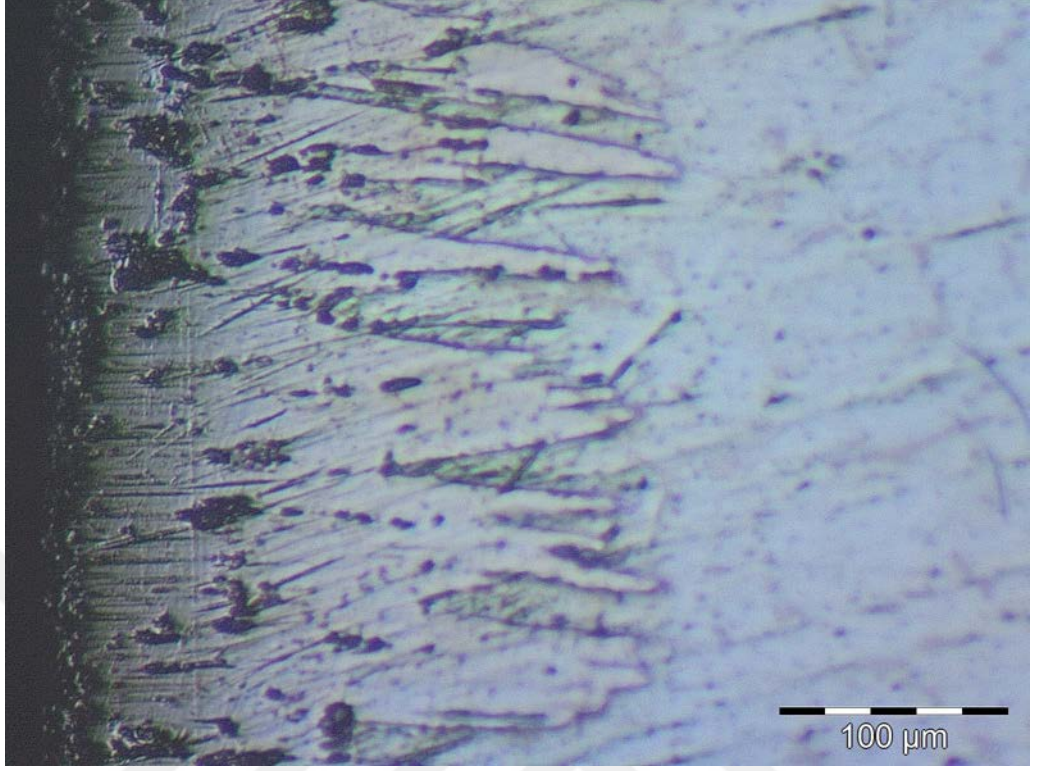
Sıvı aluminyuma daldırma sonrasında elde edilen mikroyapı resimleri şekil 4.5, 4.6 ve 4.7’de görülmektedir. Dış yüzeyde aluminyumda daldırma sonrasında korozyonun yarattığı değişiklik görülebilmektedir.



Şekil 4.5 Borlama yapılmadan sıvı aluminyuma daldırılmış numune



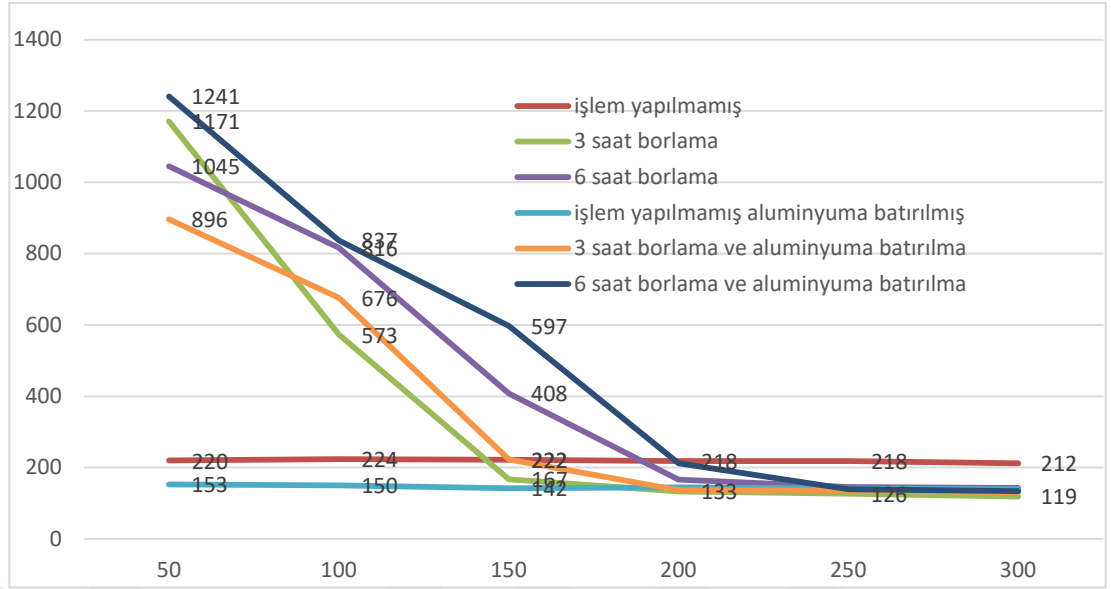
Şekil 4.6 Üç saat borlama yapılarak sıvı aluminyuma batırılmış numune



Şekil 4.7 Altı saat borlama yapılarak sıvı aluminyuma batırılmış numune

4.3 Sertlik Analizi

Elde edilen numuneler optik mikroskoptan sonra mikro vickers sertlik analizine tabi tutulmuştur. Testler yüzeyden 50 mikron aralıkta gereken yerlerde 0.2, 0.1 ve 0.05 mikro vickerste üçer kez yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Testler hem aluminyuma daldırma öncesinde hem de sonrasında yapılmıştır. Bu sayede hem borlama derinliğine dair fikir elde edilmiş hem de aluminyuma daldırmanın yüzey sertliğine etkisi gözlemlenmiştir. Test sonuçları mikroyapıda görünen borlama derinliklerini destekler niteliktedir. 200 mikrona kadar etkin 250 mikrona kadar ise azalan sertlik değerleri gözlenmiştir. Aluminyuma daldırma önce ve sonrasında bazı sertlik farkları görölse de kesin bir sonuca ulaşmak için yeterli veri yoktur. Daldırma sonrası 2 numunede sertlik azalırken bir numunede artış görölmüştür.

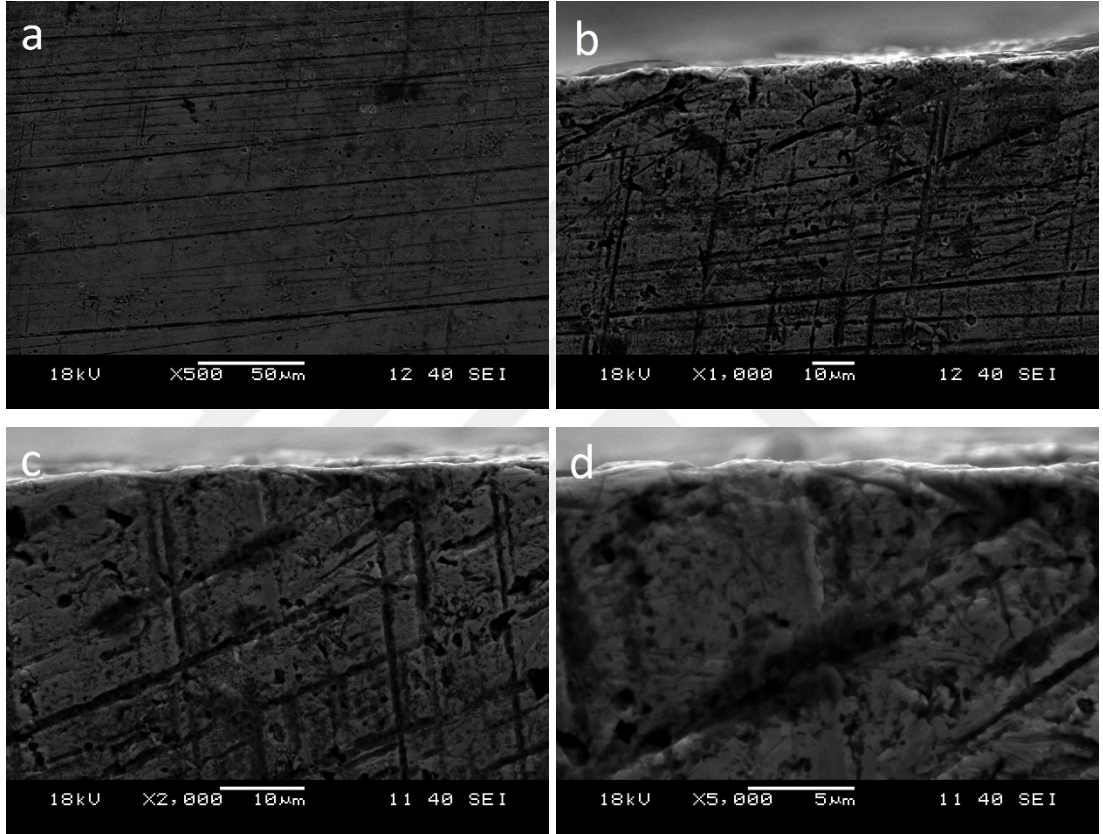


Şekil 4.8 Kesit derinliğine göre yüzeylerin sertlik değerleri

4.4 SEM ve EDS analizleri

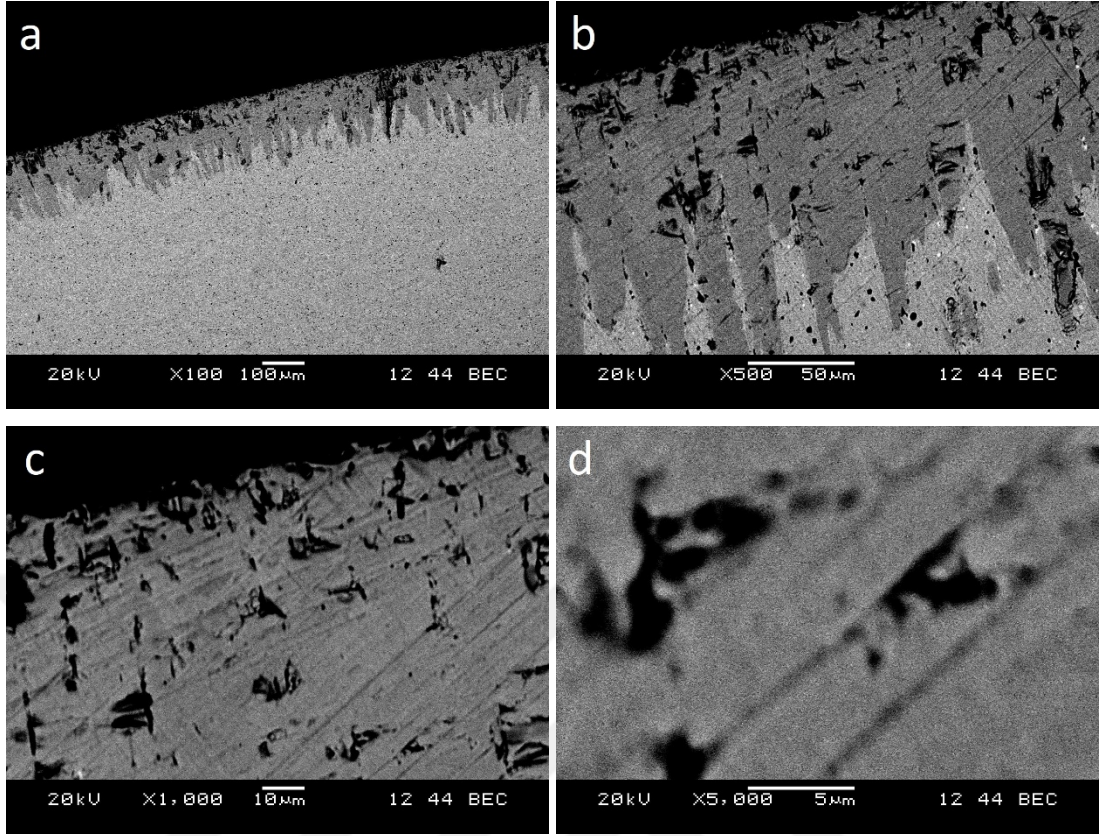
4.4.1 SEM Görüntüleri

Borlama yapılmaksızın sıvı aluminyuma daldırılan numuneden alınan SEM görüntüleri şekil 4.9.'da görülebilir.



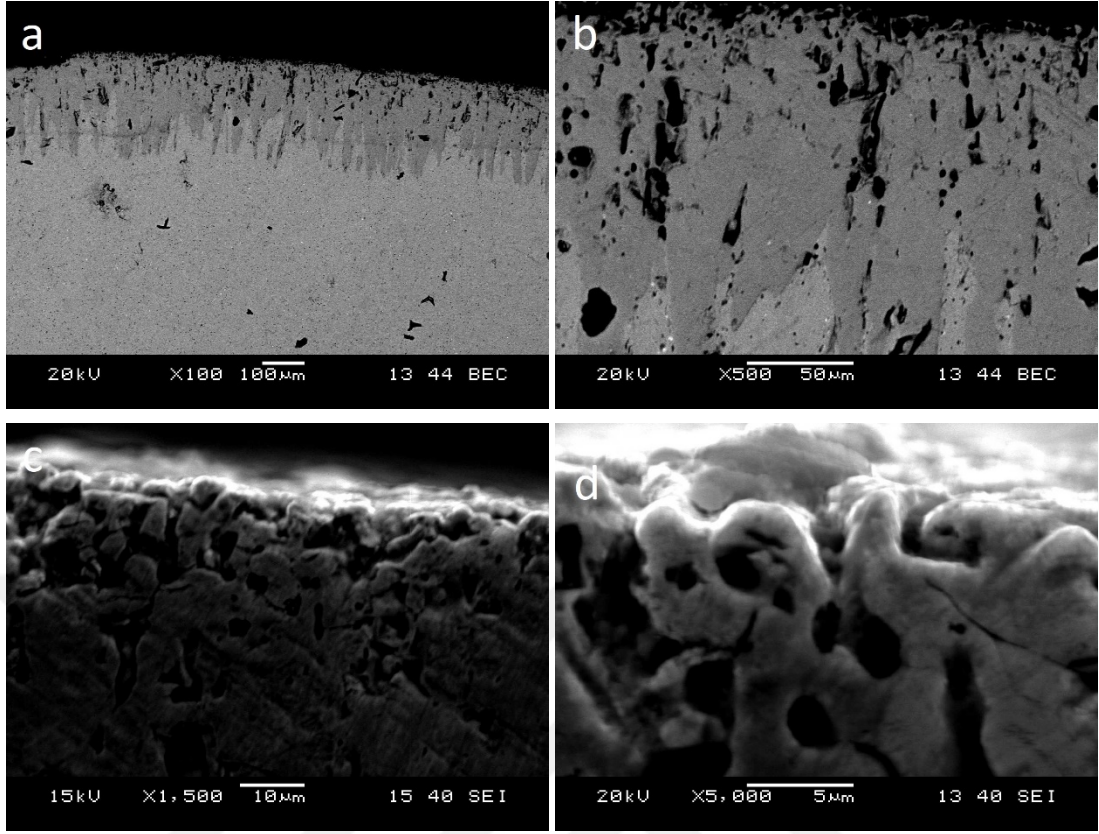
Şekil 4.9 Borlama yapılmadan sıvı aluminyuma daldırılmış numune a) 500x b) 1000x c) 2000x d)5000x

Üç saat borlama sonrası alınan sıvı aluminyuma batırılan numunelerden alınan BEI görüntüleri şekil 4.10.'da görülebilir. Birinci fotoğrafta borlama derinliği görülebilmektedir. İkinci, üçüncü ve dördüncü fotoğraflarda Fe_2B (koyu gri) ve FeB (siyah) fazları görülebilir.



Şekil 4.10 Üç saat borlama sonrası sıvı alüminyuma daldırılan numune BEI görüntüleri a) 100x b) 500x c) 1000x d) 5000x

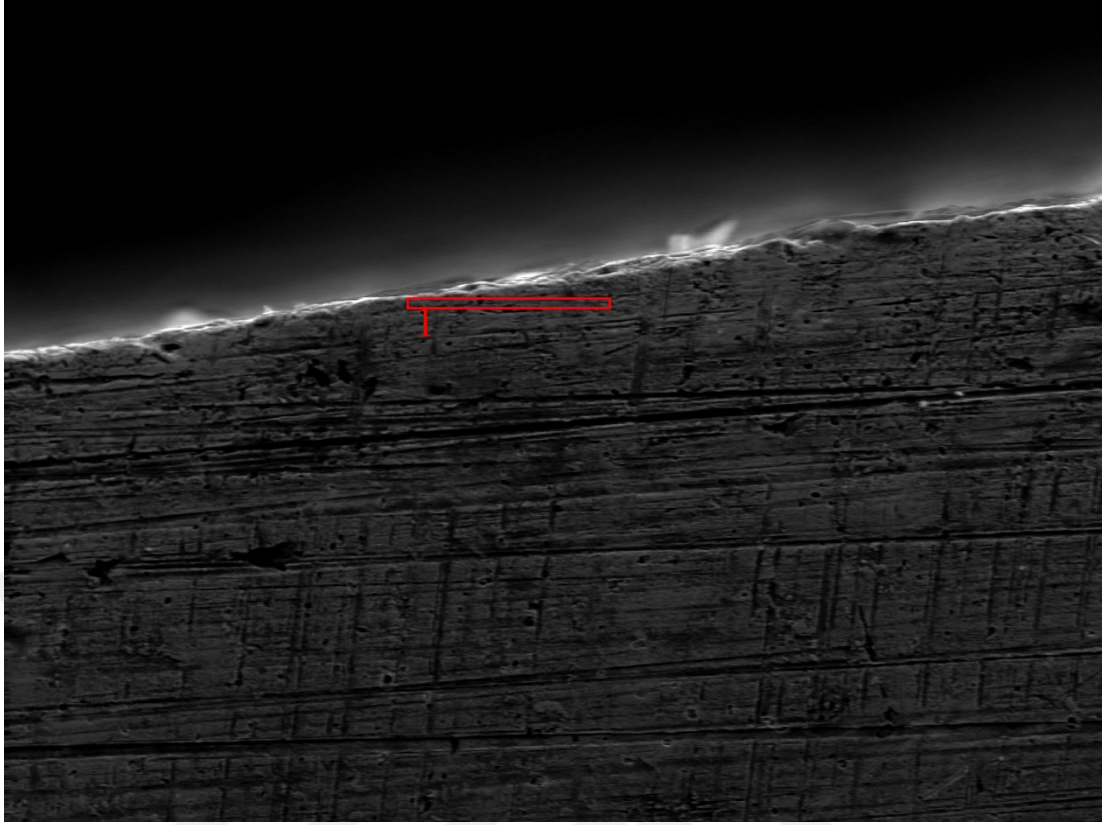
Altı saat borlama sonrası alınan sıvı alüminyuma batırılan numunelerden alınan BEI ve SEI görüntüleri şekil 4.11.'de görülebilir. Birinci fotoğrafta borlama derinliği görülebilirken, ikinci fotoğrafta fotoğraflarda Fe_2B (koyu gri) ve FeB (siyah) fazları görülebilir. Üçüncü ve dördüncü fotoğraflarda ise sınır morfolojisi görülebilir.



Şekil 4.11 Altı saat borlama sonrası sıvı aluminyuma daldırılan numune de BEI ve SEI görüntüleri a) 100x b) 500x c) 1500x d) 5000x

4.4.2 EDS Analizleri

Borlama derinliği içinde oluşan fazların kimyasal analizi ve aluminyumun korozyon etkisini görmek amacıyla EDS analizleri yapılmıştır. EDS analizlerinde kontrol edilen elementler Fe, Al ve B ile sınırlandırılmıştır.

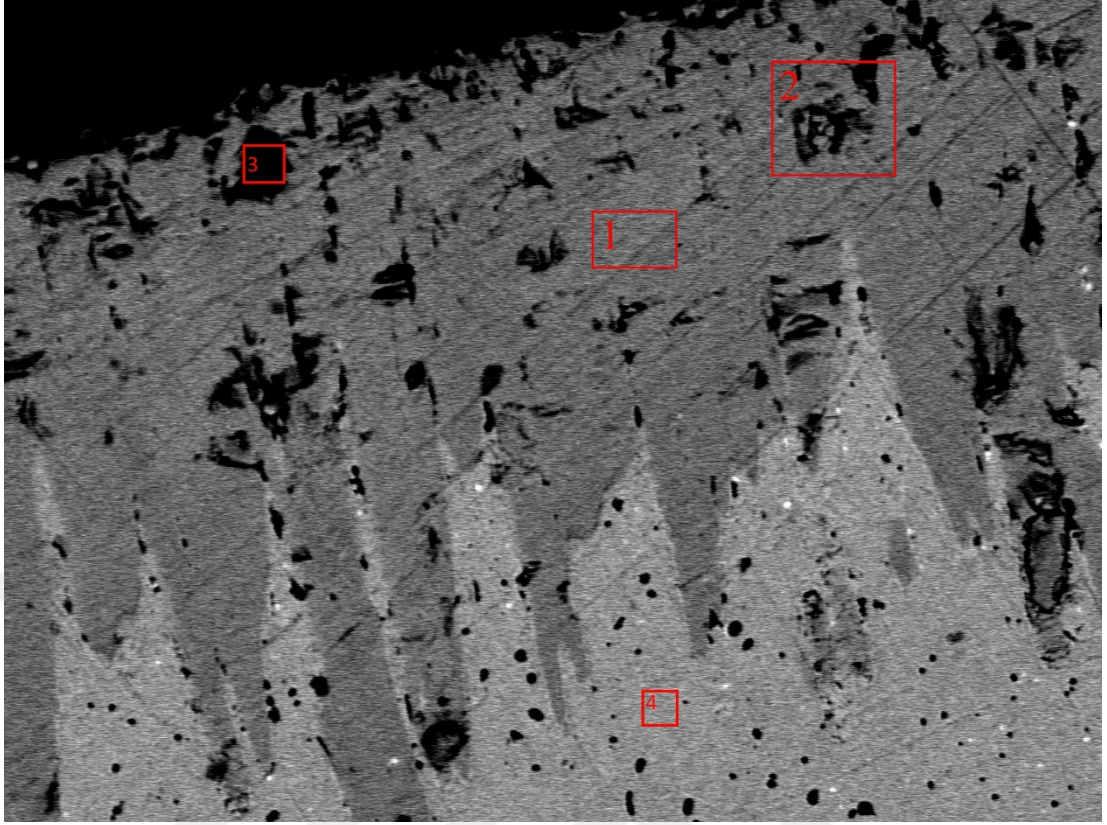


Şekil 4.12 Borlama yapılmadan sıvı alüminyuma daldırılmış numune EDS alanı

Tablo 4.1 Borlama yapılmadan sıvı alüminyuma daldırılmış numune kenar elementel yapı

Fe	Al	B
99,914%	0,816%	-

EDS analizinden görülebileceği gibi Al değeri diğer tüm numunelerdeki bölgelerdeki Al değerinden yüksektir. Ayrıca bora rastlanmamıştır.

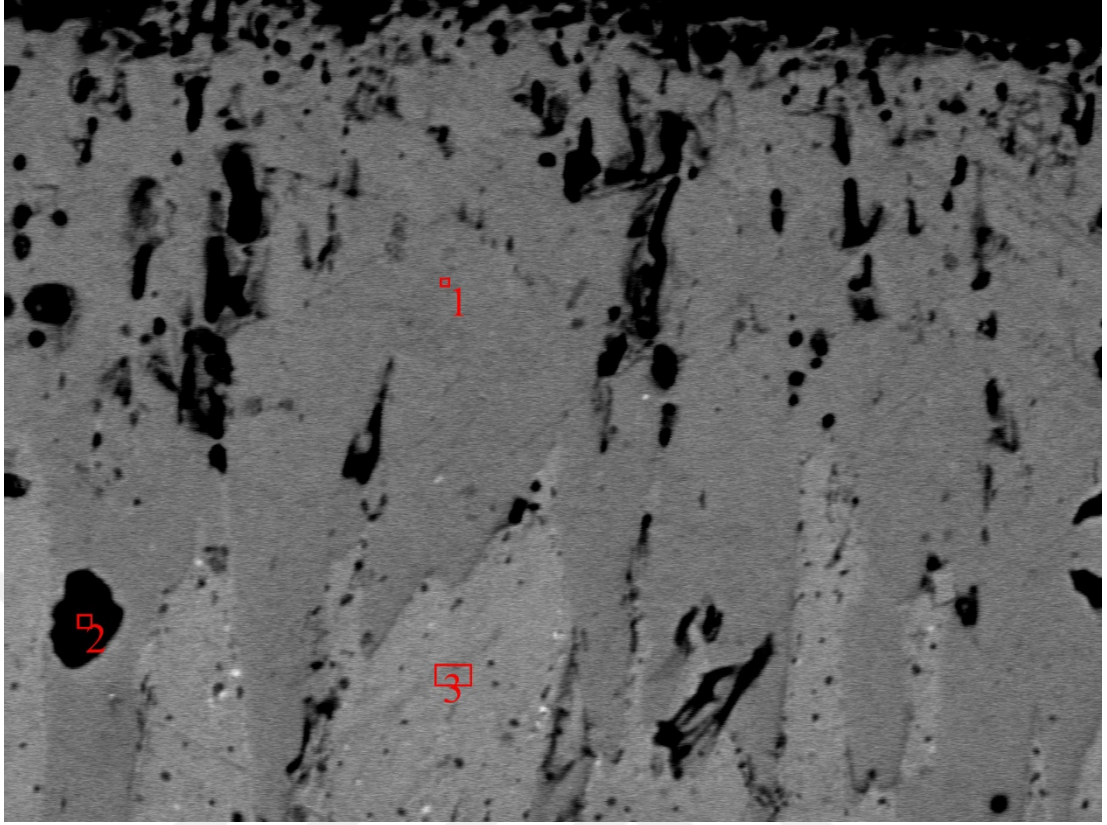


Şekil 4.13 Üç saat borlamanın ardından sıvı alüminyuma batırılan numune EDS alanları

Tablo 4.2 Üç saat borlamanın ardından sıvı alüminyuma daldırılmış numunede elementel yapı

Bölge	Fe	Al	B
1	85,554%	0,026%	14,420%
2	80,039%	0,022%	19,939%
3	57,359%	0,242%	42,399%
4	99,978%	0,022%	0,000%

EDS analizinden görülebileceği gibi 4 numaralı bölgeye borlama ulaşmamıştır. 1 numaralı bölge Fe_2B ağırlıklı bölgedir. 2 numaralı bölgede Fe_2B ve FeB karışık olarak bulunmaktadır. 3 numaralı bölgede ise FeB ağırlıklıdır.



Şekil 4.14 Altı saat borlamanın ardından sıvı alüminyuma batırılan numune EDS alanları

Tablo 4.3 Altı saat borlamanın ardından sıvı alüminyuma daldırılmış numune elementel yapısı

Bölge	Fe	Al	B
1	71,001%	0,044%	28,955%
2	13,546%	0,022%	86,214%
3	96,146%	0,042%	3,782%

Altı saat borlama görmüş numunenin EDS analizinde ise 3 numaralı bölge borun en az olduğu geçiş bölgesidir. 1 numaralı bölge Fe_2B ağırlıklıdır. 2 numaralı bölge ise borca zengin FeB fazını barındırmaktadır.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmanın ilk bölümünde pim üretiminde kullanılan vasıfsız 11SMnPb30+C alaşımlı otomat çeliği 3 ve 6 saat süreyle 1000°C’de borlanmış ve yüzeyinde sırasıyla 190 ve 250 mikron kalınlığında Fe-B tabakası oluşturulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise borlama yapılmamış, 3 saat borlama yapılmış ve 6 saat borlama yapılmış çelikler sırayla 690°C’lik ENAC-47000 alaşımlı sıvı alüminyum banyosunda bir saat bekletilmiştir.

Banyodan çıkan numuneler temizlendikten sonra ağırlık analizine tabi tutulmuş ardından metalografik muayene ile iç yapıları incelenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma neticesinde borlama süresinin sıvı alüminyum içindeki çeliğin korozyon direncine pozitif etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Borlama yapılmamış, 3 saat borlama yapılmış ve 6 saat borlama yapılmış numunelerin sıvı alüminyum içindeki hacim kayıp hızları sırasıyla 0,82; 0,27 ve 0,18 mm³/cm².saat olarak bulunmuştur. Yapılan deney sonuçlarında bulunan değerler literatür çalışmaları ile uyum sağlamaktadır. Ayrıca borlama süresi arttıkça difüzyon tabakasının kalınlığı artmakta bu da sıvı alüminyumun yarattığı korozyona karşı direnci arttırmaktadır.

Buna göre vasıfsız çeliklerin sıvı alüminyum içindeki korozyon direncini arttırmak için borlama yapılmasının ucuz ve etkili bir alternatif olduğu doğrulanmıştır.

5.2 İleriye Dönük Çalışma Önerileri

Araştırma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde borlamanın sıvı alüminyumun korozyonuna karşı direnci geliştirdiği gösterilmiştir. Alüminyum endüstrisinde sıvı alüminyum ile temasta olan ekipmanlar çoğunlukla H13 yüksek sıcaklık takım çelikleri ile imal edilmektedir. Bu tip vasıflı çeliklerin yüksek maliyetli oluşu endüstride üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Borlama vasıfsız çeliklere uygulandığında bile etkili bir korozyon koruması sağlamaktadır. Alüminyum endüstrisinde borlama yapmanın mümkün olduğu yerlerde kullanımı maliyet düşürmek için etkili bir alternatif olabilir. Sahada örneğin yüksek basınçlı dökümde yapılacak karşılaştırmalı ekipman ömür testleri bu yaklaşımın doğruluğunu test etmek için uygun bir çalışma alanı olabilir.

KAYNAKLAR

- Awan, G. ve Hasan, F. (2008). The morphology of coating/substrate interface in hot-dip-aluminized steels. *Materials Science and Engineering A*, 472 (1-2), 157-165.
- Balloy, D., Tissier, C., Giorgi, M. ve Marc, B. (2010). Corrosion mechanisms of steel and cast iron. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 41 (9), 2366-2376
- Callister, W. ve Rethwisch, D. (1985). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (8. b.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Chen, G., Wang, J., Fan, H., Li, Q., Wang, D. ve Dong, H. (2018). Combat molten aluminum corrosion of AISI H13 steel by lowtemperature liquid nitrocarburizing. *Journal of Alloys and Compounds*, 776, 702-711.
- Chen, W. ve Shi, L. (2012). Analysis of aluminum stocks and flows in mainland China from 1950 to 2009: Exploring the dynamics driving the rapid increase in China's aluminum production. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 18-28.
- Chen, W.-Q. ve Graedel, T. (2012). Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in the United States: 1900–2009. *Ecological Economics*, 81, 92-102.
- Cheng, W. ve Wang, C. (2009). Growth of intermetallic layer in the aluminide mild steel during hot-dipping. *Surface & Coatings Technology* 204 (6-7), 824-828.
- Ciacci, L., Chen, W., Passarini, F., Eckelman, M., Vassura, I. ve Morselli, L. (2012). Historical evolution of anthropogenic aluminum stocks and flows in Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 1-8.
- Davis, J. (Ed). (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*. ADB: ASM International.

- Davis, J. (Ed). (2001). *Alloying: Understanding the Basics*. ADB: ASM International.
- Dokumaci, E., Ozkan, I. ve Onay, A. (2013). Effect of boronizing on the cyclic oxidation of stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, 232, 22-25.
- Fick, A. (1855). *Annalen der Physik*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Gencer, Y., Tarakci, M. ve Calik, A. (2008). Effect of titanium on the boronizing behaviour of pure iron. *Surface & Coatings Technology*, 203 (1-2), 9-14.
- Kim, J., Kim, S. ve Kang, C. (2014). Effect of phase difference on growth kinetic of alloy layer in aluminized and diffusion-treated 12% Cr heating resistant steels. *Surface & Coatings Technology*, 240, 387-392.
- Lin, M. ve Wang, C. (2010). Microstructure and high temperature oxidation behavior of hot-dip aluminized coating on high silicon ductile iron. *Surface & Coatings Technology*, 205 (5), 1220-1224.
- London Metal Exchange. (2009). *Infomine*. 25 Haziran 2009, www.infomine.com: <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/aluminum/all/>
- Lou, D., Akselsen, O., Onsøien, M., Solberg, J. ve Berget, J. (2005). Surface modification of steel and cast iron to improve corrosion. *Surface Coatings and Technology*, 200, 5282-5288.
- Massalski, T. (1990). *Binary Phase Diagrams*. Ohio: ASM International.

Paul, A., Laurila, T., Vuorinen, V. ve Divinski, S. (2014). 3- Fick's Laws of Diffusion, *Thermodynamics, Diffusion and the Kirkendall Effects in Solids* içinde (115-139). Switzerland: Springer.

Paul, A., Laurila, T., Vuorinen, V. ve Divinski, S. V. (2014). Atomic Mechanism of Diffusion, *Thermodynamics, Diffusion and the Kirkendall Effects in Solids* içinde (167-238). Switzerland: Springer.

Pekin, Ş, (1992). *Hegzagonal bor nitrür sentezinde reaksiyon hızını kontrol eden aşamalar ve turbostatik-hegzagonal yapı geçişi*. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., İstanbul.

Sverdlin, A. (2000). Indtroduction to Aluminum. G. Toetten (Ed.), *Handbook of Aluminum* (10. baskı) içinde (1-32). New York: ASM International.

Sverdrup, H., Ragnarsdottir, K. ve Koca, D. (2015). Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 139-154.

T.C. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı. 26 Haziran 2019, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Bor>

Takata, N., Nishimoto, M., Kobayashi, S. ve Takeyama, M. (2014). Morphology and formation of Fe–Al intermetallic layers on iron hot-dipped in Al–Mg–Si alloy melt. *Intermetallics*, 54, 136-142.

Tiryakioglu, M. ve Stanley, J. (2000). Pyhsical Metallurgy and Effect of Alloying Additions in Aluminum Alloys. J. Davis, *Handbook of Aluminum* (10. baskı) içinde (81-210). New York: ASM International.

- Tsipas, D., Triantafyllidis, G., Kiplagat, J. ve Psillaki, P. (1998). Degradation behaviour of boronized carbon and high alloy steels in molten aluminium and zinc. *Materials Letters*, 37 (3), 128-131.
- Xiao, H., Chen, W. ve Liu, Z. (2012). Corrosion resistance of 91W–6Ni–3Fe refractory metal, TiAl compound and iron based alloys in molten aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (9), 2320–2326.
- Yin, F.-C., Zhao, M., Liu, Y., Han, W. ve Li, Z. (2013). Effect of Si on growth kinetics of intermetallic compounds during reaction between solid iron and molten aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23 (2), 556-561.
- Zhang, X., Chen, W., Luo, H., Li, S., Zhou, T. ve Shi, L. (2017). Corrosion resistance and interfacial morphologies of novel Fe-Cr-Mo-B cast steels in molten aluminum. *Corrosion Science*, 125, 20-28.
- Zhang, X.-m. ve Chen, W.-p. (2014). Review on corrosion-wear resistance performance of materials in molten aluminum and its alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (6), 1715-1731.
- Zhongdi, Y., Minghui, C., Chen, K., Xie, D., Zhu, S. ve Wang, F. (2019). Corrosion of enamel with and without CaF₂ in molten aluminum at 750 °C. *Corrosion Science*, 148, 228-236.
- Zhou, M., Li, K., Shu, D., Sun, B. ve Wang, J. (2003). Corrosion resistance properties of enamels with high B₂O₃–P₂O₅ content to molten aluminum. *Materials Science and Engineering*, 346, 116-121.