

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK İŞLENEBİLİRLİK KABİLİYETİNE SAHİP 2011 ALÜMİNYUM
ALAŞIMI GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlyas Artunç SARI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK İŞLENEBİLİRLİK KABİLİYETİNE SAHİP 2011 ALÜMİNYUM
ALAŞIMI GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İlyas Artunç SARI
(506201440)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Onuralp YÜCEL

TEMMUZ 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 506201440 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi İlyas Artunç SARI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Yüksek İşlenebilirlik Kabiliyetine Sahip 2011 Alüminyum Alaşımı Geliştirilmesi” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Onuralp YÜCEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Filiz ŞAHİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Doç. Dr. Ahmet TURAN
Yeditepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : 3 Haziran 2022
Savunma Tarihi : 4 Temmuz 2022





Aileme ve dostlarıma,



ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmalarımın tüm aşamalarında değerli bilgi ve tecrübesinden yararlandığım saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Onuralp YÜCEL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın tamamlanması için gereken her türlü desteği aldığım ASAŞ Alüminyum kurumuna, Ar-Ge müdürü Görkem ÖZÇELİK'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Desteğini hep hissettiğim Özge SÖZER ve Deniz TAHAN başta olmak üzere tüm arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, beni bugünlere getirmek için her türlü fedakarlığı yapan ve sürekli destekleyen babam İbrahim SARI, annem Zeynep SARI ve kardeşim İlayda SARI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2022

İlyas Artunç SARI
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Amaç.....	1
1.2 Alüminyum Üretimi	1
1.2.1. Doğrudan ani soğutmalı döküm	4
1.2.2. Homojenizasyon.....	4
1.2.3. Ekstrüzyon.....	5
1.2.4. Isıl işlem faaliyetleri.....	6
1.2.5. Eloksal kaplama	7
1.2.6. Analizler, ölçümler ve testler	8
1.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	10
1.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	16
1.5 Alüminyum Alaşımlarında Alaşım Elementlerinin Etkisi	17
1.6 Pirinç Alaşımları	20
1.7 2xxx Alaşımları	23
1.8 2011 Alaşımı	26
1.9 İşlenebilirlik	27
1.10 Konuyla İlgili Son Dönemde Yapılan Çalışmalar.....	29
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
2.1 Doğrudan Ani Soğutmalı Döküm	31
2.2 Homojenizasyon	32
2.3 Ekstrüzyon.....	33
2.4 Isıl İşlem Faaliyetleri.....	34
2.5 Eloksal Kaplama	34
3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....	37
3.1 Kimyasal Analiz Sonuçları.....	37
3.2 DSC Analizleri	37
3.3 Mikro Yapı Karakterizasyon Sonuçları.....	39
3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) Analiz Sonuçları	42
3.5 Sertlik Ölçümleri	45
3.6 Çekme Testi Sonuçları	46
3.7 İşlenebilirlik Testleri	49
3.8 Korozyon Testi	50
4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57

KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	63



KISALTMALAR

CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	: Doğrudan Ani Soğutma
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
GP	: Guinier-Preston
IACS	: Uluslararası Tavlı Bakır Standardı
OES	: Optik Emisyon Spektrometresi
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: 2xxx serisi alaşımlar için tipik homojenizasyon sıcaklıkları.....	5
Çizelge 1.2: 2xxx serisi alaşımlar için tipik ekstrüzyon parametreleri.....	5
Çizelge 1.3: Isıl işlem sembolleri ve açıklamaları.....	6
Çizelge 1.4: Bazı 2xxx alaşımları için tipik ısıtma koşulları	6
Çizelge 1.5: Sülfürik anodizasyon için tipik işlem parametreleri.....	8
Çizelge 1.6: Sert eloksal için tipik işlem parametreleri	8
Çizelge 1.7: Saf alüminyumun özellikleri	11
Çizelge 1.8: Farklı alaşımların elektrik iletkenliği ve öz direnç değerleri	11
Çizelge 1.9: Farklı alaşımların ısıtma genleşme katsayısı ve termal iletkenliği	12
Çizelge 1.10: Farklı alaşımların çekme mukavemetleri, yoğunlukları ve spesifik mukavemetleri	12
Çizelge 1.11: Bazı alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri.....	13
Çizelge 1.12: Bazı alaşımların kırılma tokluğu değerleri.....	14
Çizelge 1.13: Bazı alaşımların yorulma dayanımı değerleri	15
Çizelge 1.14: Döküm alaşımlarının isimlendirilmesi	16
Çizelge 1.15: Dövme alaşımlarının isimlendirilmesi	17
Çizelge 1.16: CuZn40Pb3 alaşımının kimyasal bileşimi.....	22
Çizelge 1.17: CuZn40Pb3 alaşımının özellikleri.....	22
Çizelge 1.18: 2xxx alaşımlarında gözlemlenen bazı fazlar ve bileşimleri	24
Çizelge 1.19: 2xxx serisi Al-Cu alaşımlarının kimyasal bileşimleri	25
Çizelge 1.20: 2011 alaşımının T4 ve T6 termik kondisyonundaki mekanik özellikleri	27
Çizelge 1.21: 2011 alaşımının özellikleri	27
Çizelge 1.22: Malzeme türlerine göre kesme hızları ve çaplara göre ilerleme	29
Çizelge 2.1: Döküm parametreleri.....	31
Çizelge 2.2: Ekstrüzyon parametreleri	34
Çizelge 2.3: Numunelere uygulanan anodizasyon parametreleri.	35
Çizelge 3.1: OES analiz sonuçları	37
Çizelge 3.2: Sertlik değerleri	46
Çizelge 3.3: DIN 50 125 standardında çekme numunesi boyutları	46
Çizelge 3.4: 165°C 12 saat ısıtma işlemi uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları.	48
Çizelge 3.5: 170°C 11 saat ısıtma işlemi uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları.	48
Çizelge 3.6: 180°C 7 saat ısıtma işlemi uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları .	48



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Avrupa alüminyum geri dönüşüm hedefleri.....	2
Şekil 1.2: Dünya alüminyum üretim rakamları	3
Şekil 1.3: Dünya alüminyum talep öngörülleri	3
Şekil 1.4: Al-Cu alaşımlarında çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma aşamaları ..	7
Şekil 1.5: Tipik çekme testi eğrisi	10
Şekil 1.6: 2011-T3 alaşımının 100 saat boyunca sabit yük altında artan sıcaklığa göre kopma gerilme değişimi	14
Şekil 1.7: 2219-T85 alüminyum alaşımının S-N (Wöhler) Eğrisi.....	15
Şekil 1.8: Cu-Zn faz diyagramı	21
Şekil 1.9: Pirinç alaşımlarında kurşun içeriğine göre işlenebilirliğin değişimi	22
Şekil 1.10: Al-Cu faz diyagramı	23
Şekil 1.11: Al-Cu alaşımlarındaki fazların solvüs sınırlarının ikili faz diyagramında gösterilmesi	24
Şekil 1.12: Devir başına ilerlemenin kesme kuvvetine etkisi.....	26
Şekil 1.13: Talaş oluşumu	28
Şekil 2.1: İş akış diyagramı	31
Şekil 2.2: a) Döküm rafinasyon aşaması, b) Döküm sırasında döküm tablası ve biyetler, c) Döküm sırasında pota görünümü, d) Rafinasyon aşaması sonrası temizlenmiş sıvı alüminyum	32
Şekil 2.3: Homojenizasyon fırınındaki 2011 alaşım biyetleri	33
Şekil 2.4: a) Ekstrüzyon presinden çıkan profiller, b) Su verme işlemi	33
Şekil 2.5: a) Çözeltiye alınan numuneler, b) Su verme işlemi, c) Isıl işlem uygulanan numuneler	34
Şekil 2.6: Farklı sürelerde ve kalınlıklarda eloksallı kaplanmış numunelerin görüntüsü	35
Şekil 3.1: 1. Biyetin homojenizasyon öncesi ve sonrası DSC analizleri	38
Şekil 3.2: 2. Biyetin homojenizasyon öncesi ve sonrası DSC analizleri	38
Şekil 3.3: 4. Biyetin homojenizasyon öncesi ve sonrası DSC analizleri	39
Şekil 3.4: 1. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (5x), b) Homojenizasyon sonrası (5x), c) Homojenizasyon öncesi (10x), d) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri	40
Şekil 3.5: 2. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (10x), b) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri	40
Şekil 3.6: 3. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (10x), b) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri	41
Şekil 3.7: 4. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (5x), b) Homojenizasyon sonrası (5x), c) Homojenizasyon öncesi (10x), d) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri	41
Şekil 3.8: a) 2011 alaşımı (2. Biyet) SEM görüntüleri, b) 2014 alaşımının optik mikroskop altındaki görüntüleri	42
Şekil 3.9: EDS analizi yapılan noktalar (2. Biyet).....	43

Şekil 3.10: Şekil 3.9'daki 1 no'lu bölgenin EDS analizi	44
Şekil 3.11: Şekil 3.9'daki 2 no'lu bölgenin EDS analizi	44
Şekil 3.12: Şekil 3.9'daki 3 no'lu bölgenin EDS analizi	44
Şekil 3.13: Şekil 3.9'daki 4 no'lu bölgenin EDS analizi	45
Şekil 3.14: Şekil 3.9'daki A bölgesinin EDS analizi	45
Şekil 3.15: DIN 50 125 standardına göre çekme testi numune görüntüsü ve boyutları	46
Şekil 3.16: DIN 50 125 standardına göre hazırlanan çekme numuneleri	47
Şekil 3.17: Zwick Zoel Z250 çekme test cihazı.....	47
Şekil 3.18: a) Talaş tipleri [60] b) Delik delme sonrası oluşan talaşlar	49
Şekil 3.19: Su, NaCl ve HCl'den oluşan korozyon çözeltisi	50
Şekil 3.20: t=0 anında korozyon ortamındaki numuneler.....	50
Şekil 3.21: 24 saat korozif ortamda bekletilmiş numuneler	51
Şekil 3.22: Eloksal kaplı olmayan numunenin görüntüsü (5x).....	51
Şekil 3.23: 4-7 µm eloksallı kaplı numunenin görüntüsü (5x).....	52
Şekil 3.24: 19-25 µm eloksallı kaplı numunenin görüntüsü (5x).....	52
Şekil 3.25: Eloksal kaplı olmayan numunenin SEM görüntüsü	53
Şekil 3.26: 4-7 µm eloksallı kaplı numunenin SEM görüntüsü	53
Şekil 3.27: 19-25 µm eloksallı kaplı numunenin SEM görüntüsü	53
Şekil 3.28: Eloksal kaplı olmayan numuneden EDS alınan bölgeler	54
Şekil 3.29: Şekil 3.28'deki 1 no'lu bölgenin EDS analizi	54
Şekil 3.30: Şekil 3.28'deki 2 no'lu bölgenin EDS analizi	54
Şekil 3.31: Şekil 3.28'deki 3 no'lu bölgenin EDS analizi	55
Şekil 3.32: Şekil 3.28'deki 4 no'lu bölgenin EDS analizi	55

YÜKSEK İŞLENEBİLİRLİK KABİLİYETİNE SAHİP 2011 ALÜMİNYUM ALAŞIMI GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Alüminyum, yerkabuğunda en çok bulunan metallerin arasındadır ve endüstrinin birçok dalında kullanımı günden güne artış göstermektedir. Doğada boksit cevheri olarak bulunmaktadır ve boksit cevherinden önce Bayer Prosesi, ardından Hall-Héroult prosesi ile metalik alüminyum elde edilmektedir.

Alüminyumun diğer metallere karşı üstün özellikleri bulunmaktadır. Bunların başında korozyona karşı yüksek direnç gelmektedir. Oluşturduğu doğal pasivasyon tabakası ile oksidasyona karşı yüksek direnç göstermektedir. Düşük yoğunluğa rağmen sahip olduğu yüksek mukavemet, spesifik mukavemet (mukavemet/yoğunluk) oranının yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu durum, hafifliğin önem arz ettiği otomotivden uçak-uzay endüstrisine kadar tüm sektörlerde alüminyum değerli kılmaktadır. Alüminyumun bir diğer avantajı ise diğer metallere göre çok daha kolay geri dönüştürülebilir olmasıdır.

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm yöntemleri ile nihai haline getirilmektedir ve yapıldıkları işleme göre sınıflandırılmaktadır. Alüminyum döküm yöntemlerine örnek olarak kum kalıba döküm, enjeksiyon döküm, alçak basınç döküm yöntemleri verilebilir. Çok farklı tipte dövme yöntemleri bulunmakla beraber, belirli fiziksel özelliklerin kontrolünün önemli olduğu hallerde dövme yöntemine başvurulmaktadır.

İşlenebilirlik, günümüzde birçok sektörde önemli bir malzeme özelliği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum için farklı metaller ve alaşımlar geliştirilip kullanılmaktadır. İşlenebilirliğin önemli olduğu ürünlerden biri de valflerdir. Valflerin üretiminde tolerans aralıkları çok düşüktür. Dolayısıyla bu alanda, işlenebilirliği iyi olan pirinç alaşımları tercih edilmektedir. Pirinç alaşımlarının korozyon direnci de yüksektir ve bu alaşımların mekanik özellikleri genel olarak Zn içeriğine bağlıdır. Ancak diğer alaşım elementleri de mekanik özelliklerini etkilemektedir.

Alüminyum alaşımlarının pirinç alaşımlarına göre birtakım avantajları mevcuttur. Bunlar üretim kolaylığı, ekonomik karşılaştırılabilirliği, alaşımın hafifliği ve yüksek spesifik mukavemetidir. Bu avantajlar gözetilerek, valf olarak kullanılabilen alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi ve kullanılması hedeflenmektedir. 2011 alüminyum alaşımı, içerdiği düşük ergime sıcaklığına sahip bizmut ve kurşun elementleri sayesinde yüksek işlenebilirlik kabiliyetine sahip bir alaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bizmut ve kurşunun oluşturduğu fazlar tane sınırına çökelmekte ve istenen kalitede talaş oluşumunu sağlamaktadır. Bu sayede kesici takımın yağlanması daha kolay gerçekleşmektedir.

Bu çalışmada valf olarak kullanılabilen kalitede alüminyum alaşımlarının üretilmesi ve geliştirilmesi amaçlanmıştır.

ASAŞ Alüminyum fabrikasında 2011 alaşımının üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu alaşım, üretimi yapılırken sırasıyla doğrudan ani soğutmalı döküm,

homojenizasyon ve ekstrüzyon aşamalarından geçmektedir. Doğrudan ani soğutmalı döküm yönteminde öncelikle alüminyum külçeler ve/veya hurdalar fırına şarj edilmekte ve metalin ergime işlemi gerçekleştirilmektedir. Ardından metal rafinasyonu ve gaz alma işlemleri yapılır. Bu işlemlerden sonra ise döküm prosesi başlatılır. Döküm prosesi sırasında döküm yolluğundan ilerleyen ergiyik metal, seramik filtrelerden geçerek döküm tablasına ulaştırılır. Üretimi gerçekleştirilecek biyetlerin çapına göre kullanılan döküm kalıpları istenen döküm hızında döküm tablasından uzaklaşır. Aynı anda su spreyi ile soğutma işlemi uygulanarak biyet üretimi gerçekleştirilir.

Homojenizasyon işlemi biyetlerin tane yapısının daha homojen hale getirilmesi ve mekanik özelliklerin biyetin her yerinde aynı olması amacıyla yapılmaktadır. Biyetler sürekli veya batch tipi homojenizasyon fırınlarına alınarak alaşıma göre belirlenen sıcaklık ve sürelerde tutulmaktadır. Homojenizasyon işlemi genel olarak alaşımın ötektik sıcaklığının hemen altında gerçekleştirilmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda kısmi ergimeler söz konusu olabileceğinden, homojenizasyon prosesi hem bu hataların önlenmesi hem de en iyi mekanik özelliklerin sağlanabilmesi açısından önemli bir procestir.

Ekstrüzyon prosesi, doğrudan ani soğutmalı döküm yöntemiyle üretilen biyetlerin ısıtılarak yüksek pres gücünde bir kalıptan basılması suretiyle istenilen şekillerdeki profillerin üretildiği bir procestir. Ekstrüzyonda, biyet sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, ekstrüzyon gücü gibi önemli parametreler mevcuttur. İstenilen alaşımlı profillerin üretilmesi için bu parametrelerin doğru seçilmesi önemlidir.

Bu çalışmada, tüm bu üretim aşamalarının proses parametreleri incelenmiştir. Doğrudan ani soğutmalı döküm yöntemiyle dökülen biyetlerin kimyasal kompozisyonu OES ile belirlenmiş ve DSC analizleri yapılmıştır. Sonrasında, ekstrüzyonla üretilen profillerin sertlik ölçümleri, çekme ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı optik mikroskop ve SEM’de incelenmiş ve EDS analizleri yapılmıştır. İşlenebilirlik kabiliyeti kontrol edilmiştir.

Gerçekleştirilen araştırmalar ve yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, 2011 alaşımının üretim parametreleri belirlenmiş, içeriğinde bulunan bizmut ve kurşunun işlenebilirliğe pozitif etki sağladığı gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak yapılan çalışmalar göstermektedir ki doğrudan ani soğutmalı döküm prosesi sırasında ergiyik metal çok iyi karıştırılmalıdır. Ayrıca, alaşımda bizmut ve kurşun içeriği 1:1 oranında bulunmalıdır. Bu sayede bizmutun genleşmesi kurşunun büzüşmesi ile dengelenecektir.

Üretilen alaşımın talaşlı imalatında oluşan talaşın standartlarda istenen özellikte olduğu belirlenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen ekstrüzyon denemelerinde 2011 alaşımı için en yüksek ekstrüzyon hızı 1,7 mm/sn olarak belirlenmiştir. Bu hızın aşılması halinde profilde çeşitli yüzey hataları görülmektedir. Daha yüksek ekstrüzyon hızına ulaşabilmek adına, homojenizasyon sıcaklıkları değiştirilerek ileri çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Bu çalışmada valf olarak kullanılabilecek alaşımlara eloksal kaplama yapılarak korozyona direnci de ölçülmüştür. Elokсал kaplı olmayan numunede en derin korozyon 562 µm, 4-7 µm aralığında eloksal kaplı numunede 505 µm, 19-25 µm aralığında eloksal kaplı numunede ise 201 µm olarak ölçülmüştür. 19 µm ve üzeri eloksal kaplamada uzun süreli korozyon direnci oluşturmamasının mümkün olduğu görülmüştür.

DEVELOPMENT OF HIGHLY MACHINABLE 2011 ALUMINIUM ALLOY

SUMMARY

Aluminium is among the most abundant metals in the earth and its use in many branches of industry is increasing day by day. It is found in nature as bauxite ore, and metallic aluminium is obtained from bauxite ore by the Bayer Process, followed by the Hall-Héroult process.

Aluminium has some superior properties against other metals. One of these properties is its high resistance to corrosion. It shows high resistance against oxidation with the natural passivation layer it creates. Despite its low density, its high strength ensures that the strength/density ratio is high. This makes aluminium valuable in all sectors, from the automotive to the aerospace industry, where lightness is important. Another advantage of aluminium is that it can be recycled much more easily than other metals. It is also a prominent metal in terms of machinability. Especially 2011 alloy can be machined very easily and is used in sectors where machinability is very important.

Aluminium is classified as forging and casting alloys. Sand mold casting, injection molding, low pressure casting methods can be given as examples of aluminium casting methods. While there are many different types of forging methods, forging alloys can be used when control of certain physical properties is important.

Machinability is an important material property in many sectors today. For this, different metals and alloys are developed and used. One of the products where machinability is important is valves. The tolerance ranges in the production of valves are very low. Therefore, brass alloys with very good machinability are preferred. Brass alloys have high corrosion resistance and very good machinability. Therefore, it is highly preferred in the industry. The mechanical properties of brass alloys generally depend on Zn content. However, other alloying elements also affect its mechanical properties.

Aluminium alloys have some advantages over brass alloys. These can be listed such as easy production, lightness, high specific strength and economic comparability. 2011 aluminium alloy has high machinability thanks to its low melting temperature elements such as bismuth and lead. The phases formed by bismuth and lead precipitate at the grain boundary and support the chip formation. In this way, the lubrication of the cutting tool is easier. This alloy can also be produced in the ASAŞ Aluminium factory.

The production of the 2011 alloy goes through the stages of direct chill (DC) casting, homogenization and extrusion, respectively. In the direct chill casting method, aluminium ingots and/or scraps are first charged into the furnace, and the melting process is carried out. After metal refining and degassing processes, casting process is started. The molten metal passes through the casting runner and ceramic filters and reaches the casting table. Casting molds used according to the diameter of the billets to be produced move away from the casting table at the desired casting speed. Billet production is carried out by applying the cooling process with water spray at the same

time. Non-destructive testing is performed on the produced billets by ultrasonic method and their quality is checked.

Homogenization process is executed in favor of make the grain structure of the billet more homogeneous and to ensure that the mechanical properties are the same in all parts of the billet.

Billets are taken into continuous or batch type homogenization furnaces and kept at temperatures and times determined according to the alloy. This temperature is generally selected just below the eutectic temperature of the alloy. Since partial melting may occur at higher temperatures, the homogenization step is an important process in terms of not observing these failures and providing the best mechanical properties.

Extrusion is a process in which profiles in desired shapes are produced by heating the billets produced by DC casting and pressing them from a die with high press power. There are important parameters such as billet temperature, extrusion speed, extrusion power in extrusion. It is important to choose these parameters correctly in order to produce the desired alloy profiles.

In the study, the parameters of all these production stages were examined. The chemical composition of the billets was specified by Optic Emission Spectrometry (OES) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) analyzes were made. Percentage of elements in the samples was determined by OES. By determining the thermal behavior of the materials, interpretation of the thermal processes can be made. Therefore, thermal analysis is important. In DSC analysis, energy change in the sample can be measured depending on the temperature changes, and the thermal behavior can be determined. Thermal behavior of 2011 alloy was studied by DSC analysis. Hardness, tensile and corrosion tests of the profiles were also carried out.

Microstructure was examined in optical microscope and SEM and EDS analyzes were made. Cu phase is the main alloying element of 2xxx series aluminium alloys. Al_2Cu phase precipitates in the microstructure and strengthens the material. In SEM analysis, this phases (Al_2Cu) in the 2011 alloy were observed. The machinability ability has also been examined. As a result of the examinations, it was observed that the machinability of the 2011 alloy was very good.

The 2011 alloy was brought to T6 heat treatment condition and its mechanical properties were examined. In T6 condition, mechanical properties of the material are at the highest level. These mechanical properties were tested by performing hardness and tensile tests and it was observed that results were within tolerance ranges determined by related standard.

Aluminium is a corrosion resistant metal thanks to its natural Al_2O_3 layer. However, this property is not sufficient for its use in industrial sectors. The controlled formation of this layer is very important in terms of material life. When the corrosion behaviors are examined, it can be said that the anodized coating increases the corrosion resistance of the 2011 alloy. When the anodizing thickness increases, the resistance of the alloy increases and the service life is extended.

On the basis of researches and experimental studies, production parameters of 2011 alloy were determined, and it was observed that bismuth and lead contained in it had a positive effect on the machinability. Results also show that while performing the direct chill casting process, molten metal should be mixed very well, and chemical analysis should be carried out periodically in the furnace to check whether the

chemical composition is within the standards or not. Therefore, care should be taken to keep the bismuth and lead content in the molten metal at a ratio of 1:1. This parameter is important as the expansion of bismuth during solidification will compensate for the shrinkage of lead.

It has been determined that the chips formed in the machining of the produced alloy has desired properties in the standards. In the extrusion trials, the highest extrusion speed for the 2011 alloy was determined as 1.7 mm/sec. If this speed is exceeded, various surface defects are seen in the profile. In order to achieve higher extrusion speed, it is recommended to carry out further studies by changing the homogenization temperatures.

In this study, the corrosion resistance was also measured by anodizing the alloys that can be used as valves. The deepest corrosion was measured 562 μm in the non-anodized sample, 505 μm in 4-7 μm anodized sample and 201 μm in 19-25 μm anodized sample. Long-term corrosion resistance is possible in anodized coating of 19 μm and above.





1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Amaç

Alüminyum, yer kabuğunda demirden sonra [1] en çok bulunan metalik elementtir ve 19. yüzyıl sonlarına doğru mühendislik uygulamalarında ekonomik olarak üretilebilir hale gelmiştir [2]. İlk içten yanmalı motorlu araçların ortaya çıkması ile birlikte, bir otomotiv malzemesi olarak alüminyumun mühendislik değeri giderek artmaya başlamıştır [2]. Elektriğin uzun mesafelere iletimi için hafif ve iletken malzeme ihtiyacını karşılayan alüminyum, Wright kardeşlerin havacılık üzerine yaptığı çalışmalar ile birlikte güçlü, hafif ve kırılmaya dayanıklı parçalar üzerine doğan yeni endüstride de yerini almıştır [2].

Bu günlere gelindiğinde alüminyum otomotiv, savunma sanayii, havacılık, raylı sistemler, denizcilik gibi birçok ulaştırma sektöründe katma değerli ürün eldesinde kullanılmaktadır. Alüminyum üretimi genel olarak cevherden ve geri dönüştürülmüş hurdadan yapılmaktadır. Günümüzde cevherden alüminyum üretimi hurdadan alüminyum üretiminin yaklaşık iki katıdır [3].

Alüminyum, sahip olduğu avantajlar sayesinde etkisini valf sanayisinde de artırmaktadır. Geçmişten beri valf üretiminde sıklıkla pirinç alaşımları kullanılmaktadır. Üretim kolaylığı, hafifliği, yüksek spesifik mukavemeti, iyi işlenebilirliği, iyi korozyon direnci ve ekonomik karşılaştırılabilirliği sebebiyle valf üretiminde alüminyum alaşımları tercih edilebilir. Belirtilen avantajlar gözetilerek, bu çalışmada valf olarak kullanılabilecek alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi ve kullanılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, döküm, homojenizasyon, ekstrüzyon, ısıtma işlem ve eloksallama prosesleri gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri ve mekanik testler yapılarak ve iç yapı ilişkileri incelenerek buna uygun proses geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.2 Alüminyum Üretimi

Alüminyum üretimi genelde birbirini takip eden iki prosesle gerçekleştirilmektedir. Bunlar Bayer prosesi ve Hall-Héroult prosesidir. Bayer prosesi boksit cevherinden

alümina eldesi için kullanılmakla beraber, Hall–Héroult prosesi ise ergimiş tuz elektrolizi yoluyla alüminadan metalik alüminyum üretiminde kullanılmaktadır [4].

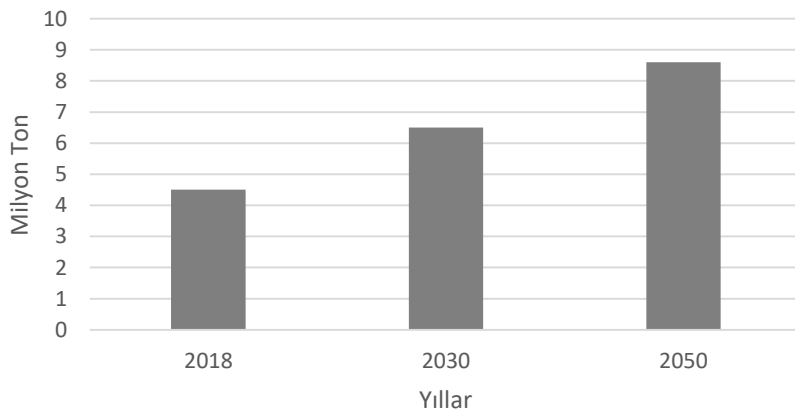
Bayer prosesi, 1887 yılında Karl Bayer tarafından geliştirilmiştir. Temelde beş adımda gerçekleşmektedir. Bunlar hazırlama, çözündürme, çözelti temizleme, çöktürme ve kalsinasyondur [4].

Alüminanın (Al_2O_3) elektrolitik prosesi birbirinden bağımsız olarak 1886 yılında Charles Hall tarafından Ohio’da (ABD), Paul Héroult tarafından Fransa’da geliştirilmiştir [2]. Bu yüzden proses Hall–Héroult prosesi olarak adlandırılmaktadır ve pratik kullanımda alümina redüksiyonunda kullanılan tek yöntemdir [5]. Bu yöntem ile yaklaşık %99 saflıkta alüminyum metal eldesi gerçekleştirilebilmektedir [6]. Denklem 1.1 Hall–Héroult prosesinin tüm toplam reaksiyonunu göstermektedir.

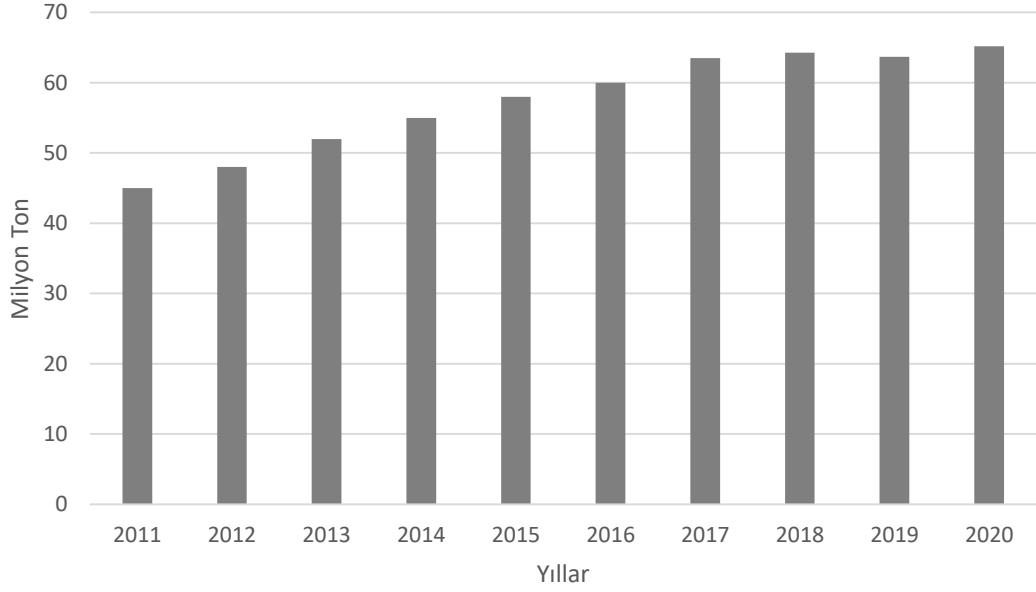


Sektör raporlarından hareketle, alüminyumun küresel talebinin 2050 yılına kadar iki katından fazla artması beklenmektedir [3]. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının pazar büyüklüğü 2019 yılında 31,15 milyar dolar değerindedir ve 2020’den 2027’ye kadar %3,5’lik yıllık bileşik büyüme oranında artış beklenmektedir [6].

Şekil 1.1’de Avrupa alüminyum geri dönüşüm hedefleri, Şekil 1.2’de ise dünya alüminyum üretim rakamları gösterilmiştir.

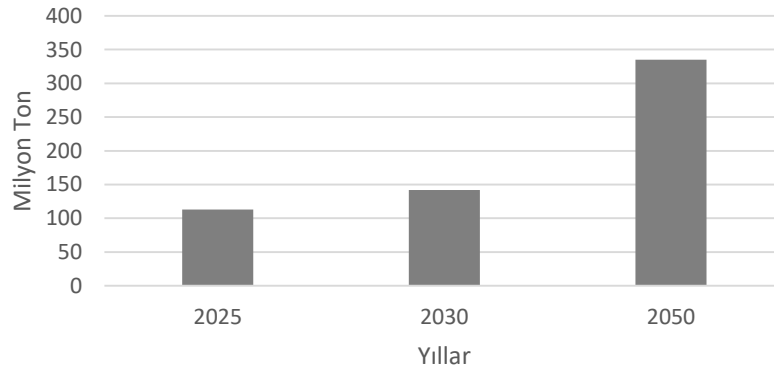


Şekil 1.1 : Avrupa alüminyum geri dönüşüm hedefleri [7].



Şekil 1.2 : Dünya alüminyum üretim rakamları [7].

Giderek artan alüminyum üretiminin yanında alüminyum talebinde de artışlar beklenmektedir. 2050 yılına gelindiğinde dünya alüminyum talebinin 335 milyon ton seviyelerine ulaşması öngörülmektedir. Şekil 1.3'te dünya alüminyum talep öngörülleri verilmiştir.



Şekil 1.3 : Dünya alüminyum talep öngörülleri [7].

Alüminyum alaşımlı profillerin üretilebilmesi için birtakım yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri ekstrüzyondur ve alüminyum endüstrisinde tercih edilmektedir. Ekstrüzyonla şekillendirilebilen alaşımların üretilebilmesi için ilk adım olarak biyet üretimi gerçekleştirilmelidir. Bu işlem doğrudan ani soğutmalı döküm yapılarak gerçekleştirilmektedir.

1.2.1. Doğrudan ani soğutmalı döküm

Ekstrüzyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için biyet dökülmesi gerekmektedir. Doğrudan ani soğutmalı döküm yöntemi, yüksek soğutma hızı ve verimli üretim gibi avantajlar sağladığından tercih edilmektedir [8] ve biyet üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir. İşlemin proses aşamaları genel olarak alüminyum külçelerin, alaşım elementlerinin ve/veya hurdaların fırına şarj edilmesi ve ergitilmesi, gaz giderme işlemlerinin gerçekleştirilmesi, filtrasyon ve dikey döküm olarak sıralanabilir. Doğrudan ani soğutmalı döküm işlemi özellikle 2xxx ve 7xxx serisi sert alaşımlarda diğer yöntemlere nazaran düşük segregasyon, az çatlama, esnek üretim gibi avantajlara sahiptir [9].

Doğrudan ani soğutmalı döküm sırasında alaşımın kimyasal içeriği analiz edilmektedir. OES (Optik Emisyon Spektrometresi), alaşım içerisindeki elementlerin yüzde olarak tayininin gerçekleştirildiği bir niceliksel ve niteliksel analiz yöntemidir [10]. Bu yöntemde bir elektrot yardımı ile yüksek voltaj oluşturulmakta ve bunun sonucunda numune ısıtılmakta, kısmi buharlaştırılmakta ve nihai olarak atomlar uyarılmaktadır. Bu uyarı ile elementlerden karakteristik enerji yayılmaktadır. Oluşan karakteristik spektral çizgilerin sensörler yardımıyla algılanması sonucunda malzemedeki elementlerin yüzde miktarları belirlenmektedir [10].

1.2.2. Homojenizasyon

Homojenizasyon işlemi, ekstrüze edilecek doğrudan ani soğutmalı dökümle üretilen biyetler için vazgeçilmez bir işlemdir. Tane boyutu, tane morfolojisi, kristalografik karakter gibi mikro yapısal özelliklerdeki değişiklikler homojenizasyon işlemine bağlıdır [11]. Ayrıca homojenizasyon sırasında çökelen partiküllerin boyutunu, yoğunluğunu ve dağılımını kontrol etmek çok önemlidir [12]. Homojenizasyon işlemiyle mikro segregasyonlar da azaltılabilmektedir [13].

2xxx serisi alaşımlarda likidüs ve solidüs sıcaklık aralığının geniş olması nedeniyle katılaşma yavaş gerçekleşmekte ve kaba dentritik formasyonla sonuçlanmaktadır. Mikro segregasyon önem arz etmekle beraber homojenizasyon sırasında çözünme yavaş gerçekleşmektedir [14]. Bazı 2xxx serisi alaşımlar için tipik homojenizasyon koşulları Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : 2xxx serisi alaşımlar için tipik homojenizasyon sıcaklıkları [14].

Alaşım	Sıcaklık (°C)
2014	490
2024	490
2219	490
2618	520

1.2.3. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon işlemi, doğrudan ani soğutma yöntemi ile üretilen biyetlerin yüksek basma kuvveti ile daha küçük kesitli profil haline getirildiği bir şekillendirme yöntemidir ve ekstrüzyon, biyetlerin şekillendirilmesi için en uygun yöntemdir [9]. Ekstrüzyon prosesinin ilk aşaması olarak biyetlerin ısıtılması gerekmektedir [14]. Bu sayede biyetlerin daha kolay şekil değiştirmesi sağlanmaktadır [9]. Ancak optimum ekstrüzyon koşulları yalnızca ekstrüzyon ürününe değil, konteynır boyutuna, ekstrüzyon oranına ve basınca da bağlıdır. Ayrıca 2xxx serisi alaşımlar rekristalizasyona duyarlıdır [14]. 2xxx serisi alaşımlar için tipik ekstrüzyon koşulları Çizelge 1.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2 : 2xxx serisi alaşımlar için tipik ekstrüzyon parametreleri [14].

Alaşım	Biyet Sıcaklığı (°C)	Ekstrüzyon hızı (m/dk)
2014	400 – 460	2-3,5
2024	300 – 460	1,5-3,5
2219	300 – 460	2,5-6
2618	380 – 430	2,5-4

Biyet sıcaklığının oda sıcaklığından çok daha yüksek olması gerekmektedir. Malzemelerin yüksek sıcaklıkta akma gerilmeleri düşmektedir. Ekstrüzyon da bir plastik deformasyon prosesi olduğundan, sıcaklık artışı bu işlemi kolaylaştırmaktadır. Ancak sıcaklığın çok fazla yükseltilmesi malzemede kısmi ergimelere sebep olabilir. Bu yüzden sıcaklığın optimum aralıkta olması önemlidir [9].

Ekstrüzyon hızı, preste basılan biyetlerin alaşımına göre değişmektedir. Hızın değişimi ile pres basıncı, dolayısıyla pres çıkışı sıcaklık da değişmektedir. Alüminyumun termal iletkenliği yüksektir ve ekstrüzyon hızı kaynaklı meydana gelen ısının dağılması alüminyum alaşımlarında daha da önem arz etmektedir [9].

1.2.4. Isıl işlem faaliyetleri

TS EN 515 standardına göre temel ısıl işlem tanımlamaları Çizelge 1.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 : Isıl işlem sembolleri ve açıklamaları.

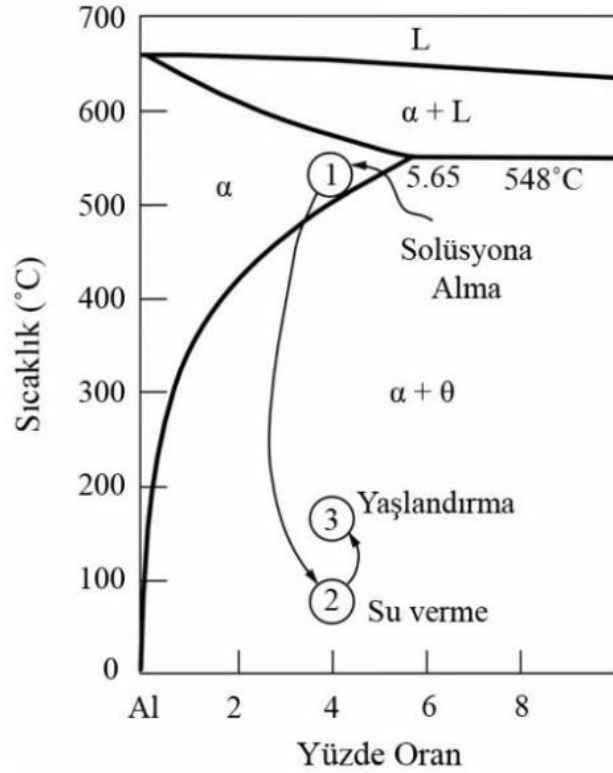
Isıl İşlem	Açıklama
T1	Şekillendirme prosesi sonrası su verme ve doğal yaşlandırma
T2	Şekillendirme prosesi sonrası su verme, soğuk deformasyon ve doğal yaşlandırma
T3	Çözeltiye alma, soğuk deformasyon ve doğal yaşlandırma
T4	Çözeltiye alma ve doğal yaşlandırma
T6	Çözeltiye alma sonrası su verme ve yapay yaşlandırma

T4 ısıl işlemi için çözeltiye alma ve sonrasında doğal yaşlandırma yapılması, T6 ısıl işlemi için ise çözeltiye alma sonrası yapay yaşlandırma yapılması gerekmektedir. Şekil 1.4'te Al-Cu alaşımlarında sırasıyla çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma aşamalarının faz diyagramı üzerindeki ilerleyişi gösterilmektedir.

T6 ısıl işlem kondisyonunun sağlanabilmesi için yapay yaşlandırma yapılması gerektiğinden bu koşulların da belirlenmesi önemlidir. Bazı 2xxx alaşımları için tipik yaşlandırma koşulları Çizelge 1.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 1.4 : Bazı 2xxx alaşımları için tipik ısıl işlem koşulları [14].

Alaşım	Temper	Sıcaklık (°C)	Zaman (saat)
2011	T6	185	4 saat
2014	T6	170	10 saat
2219	T6	165-190	18 – 36 saat
2618	T61	200	20 – 24 saat



Şekil 1.4 : Al-Cu alaşımlarında çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma aşamaları [15].

2011 alaşımı için önerilen çözeltiye alma sıcaklığı 525°C, yaşlandırma için ise önerilen koşullar 160°C 14 saattir [16]. 2011 alaşımının su verme işlemine girme sıcaklığı olarak minimum 450°C seçilmelidir [14].

1.2.5. Eloksal kaplama

Alüminyum alaşımlarının yüzeyine korozyondan korunmak, aşındırmaya karşı güçlendirmek gibi birçok sebepten dolayı kaplama yapılması gerekmektedir ve CrO_3 , H_2SO_4 gibi kaplama çeşitleri mevcuttur. Yapılan literatür taramalarına göre, sülfürik anodizasyon için tipik işlem parametreleri Çizelge 1.5'te gösterilmiştir. Bu proses ile normalde minimum 8 μm boyutunda eloksal kaplama yapılmaktadır. Bu parametrelerle elde edilen kaplamalar aşınmaya karşı orta derecede koruma sağlamaktadır [17]. Bu koşullardaki eloksal kaplamanın görünüşü saydamdır [18] ve görünüşün önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir [17].

Çizelge 1.5 : Sülfürik anodizasyon için tipik işlem parametreleri [17].

Parametreler	Değerler
Elektrolit konsantrasyonu	%15 H ₂ SO ₄
Sıcaklık	21 ± 1°C
Banyo süresi	30-60 dakika
Voltaj	15-22 V
Akım yoğunluğu	1-2 A/dm ²

Daha agresif ortamlara karşı koruma sağlamak amacıyla sert eloksal yapılmaktadır. Sert eloksalın tipik işlem parametreleri Çizelge 1.6'da gösterilmiştir. Bu parametrelerle normalde 50 µm'lik kaplama yapılmaktadır fakat istenilen kalınlığa göre ayarlamak mümkündür. Diğer yöntemlere nazaran çok daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılabilir. Sanayi uygulamalarında valf için üretilen alaşımlarda kullanılmaktadır. Çok daha agresif korozif ortamlara karşı yüksek dayanıklılık sağlamaktadır. Tüm bunlara ek olarak elektriksel yalıtkanlık gereken uygulamalar için de kullanılmaktadır [17] ve 600 HV üzerinde görünüşü saydamdır [18]. Sert eloksal uygulamaları diğer eloksal uygulamalarına nazaran en pahalı olan uygulamadır. Kabaca, CrO₃ anodizasyondan %50, H₂SO₄ anodizasyondan 2 katı daha pahalıdır [17].

Çizelge 1.6 : Sert eloksal için tipik işlem parametreleri [17,18].

Parametreler	Değerler
Elektrolit konsantrasyonu	%22-24 H ₂ SO ₄
Sıcaklık	0 ± 1°C
Banyo süresi	20-120 dakika
Voltaj	25-60 V
Akım yoğunluğu	2,5-4 A/dm ²

1.2.6. Analizler, ölçümler ve testler

Malzemelerin davranışlarını belirlemede termal analizler önem arz etmektedir. Bu davranışların belirlenmesiyle birlikte ısı süreçleri de buradan yorumlanabilmektedir. [19]. DSC (Differential Scanning Calorimetry)'de sıcaklık değişimlerine bağlı olarak numunedeki enerji değişimi ölçülmektedir. Cihaz içerisindeki iki farklı kolu iki farklı ısıtıcı ısıtmaktadır ve ısıtma esnasında numune ve referans aynı sıcaklıkta tutulmaya çalışılır. Numuneye ısı verilirken birden sıcaklığı artarsa, referansı da aynı sıcaklığa çıkaracak kadar ısı verilerek aradaki enerji farkı hesaplanır ve bu enerji farkına göre yorumlamalar yapılır. Hesaplamalar entalpi üzerinden ilerlemektedir. Temel mantık, numune ve referansın aynı sıcaklıkta tutulmasıdır. DSC analizi ile sıcaklık artışı

sırasında ekzotermik veya endotermik reaksiyonların hangi sıcaklıklarda meydana geldiği bilgisine ulaşılabilmektedir. Ayrıca DSC ile camsı geçiş sıcaklığı, ısı kapasitesi artışı, ergime ve kaynama noktaları, buharlaşma ısıları, kristalleşme sıcaklıkları gibi malzeme özellikleri belirlenebilmektedir [20].

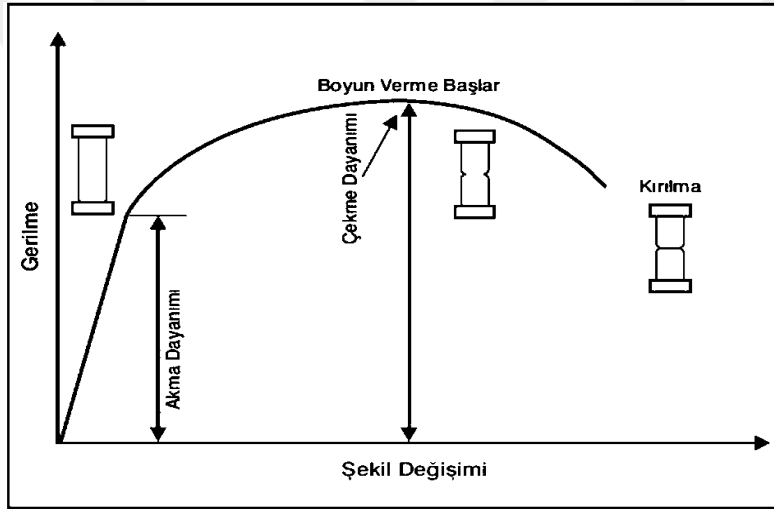
Biyetlerden alınan numunelerin mikro yapı incelemelerinin yapılabilmesi için hazırlanması gerekmektedir. Bu hazırlık temel olarak numunelerin uygun boylara kesilmesi, bakalite alınması, zımparalama, parlatma ve dağlama şeklinde gerçekleşmektedir [21]. Parlatma işlemi genelde iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlar kaba ve ince parlatmadır [21]. Optik mikroskopla görüntüleme, malzemelerin mikro yapı karakterizasyonlarının ilk adımı olarak belirtilebilir. Tipik bir optik mikroskop objektif, oküler, aydınlatıcı, polarizatör, analizör, eliptik kondansör, toplayıcı mercek elemanlarından oluşmaktadır [19].

SEM (Scanning Electron Microscope), elektron demetini numune üzerine odaklayarak numune üzerinin taranmasını sağlayan bir elektron mikroskobu çeşididir [19]. Mikro yapı morfolojisi, kimyasal bileşim [22], tane sınırları, faz sınırları, inklüzyon dağılımı ve kırılma yüzeyleri [23] için en güçlü görüntüleme yöntemlerinden biridir. SEM komponentleri temel olarak elektron tabancası, odaklayıcı lensler, tarama bobinleri, görüntü mercekleri ve detektörlerden oluşmaktadır [22]. SEM’de incelenecek numuneler bakalit içerisinde olduğundan, görüntülerin iyi kalitede alınabilmesi için püskürtümlü kaplama yöntemi ile bakalitin üzeri kaplanmaktadır [24].

EDS analizi, elementlerin kendine has karakteristik elektron enerji seviyelerini kullanarak yapılan bir kantitatif analiz yöntemidir [19] ve en önemli kullanımı, malzemelerdeki elementlerin konsantrasyonunun veya miktarının nicel olarak belirlenmesidir [23].

Sertlik testi, genellikle bilinen geometri ve mekanik özelliklere sahip bir indenter test numunesine batırarak gerçekleşmektedir. Test için ayrıntılı numune hazırlığı gerektirmediğinden, ucuz ve hızlı olduğundan malzemeleri mekanik olarak karakterize etmenin belki de en basit ve en ucuz yöntemidir. Test sırasında indenter malzemeye batırıldığı için sertlik testi aynı zamanda bir malzemenin basma yüklerine direnme yeteneği olarak da görülmektedir [25]. Brinell sertlik testinde, malzemenin pürüzsüz yüzeyine sabit basınç altında sert küresel bir indenter batırılarak ölçüm yapılmaktadır [25].

Malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesi için en sık tercih edilen tahribatlı testlerden biri çekme testidir. En basit haliyle, çekme cihazının numuneyi zıt uçlarından kavrayarak çekmesi şeklinde uygulanmaktadır. Test sonucunda gerilme-birim şekil değişimi eğrisi elde edilmektedir ve bu eğri sayesinde malzemelerin birçok mekanik özelliği tayin edilebilmektedir. Şekil 1.5'te çekme testinden elde edilen tipik bir eğri gösterilmektedir. Tek eksenle yapılan testlerin çıktılarına göre akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama, kopma gerilmesi, kopma uzaması, elastisite modülü, poisson oranı, kesit alanı daralması gibi malzeme özellikleri elde edilebilmektedir. Bunlara ek olarak, test sonucu kopan malzemenin kopma yüzeyinin incelemesi gerçekleştirilebilmekte, gösterdiği kırılma karakteri (sünek veya gevrek) belirlenebilmektedir [26].



Şekil 1.5 : Tipik çekme testi eğrisi [27].

1.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Malzemelerin farklı koşullar altında davranışlarını irdeleyebilmek adına malzeme özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Bu sayede istenen koşullar altında uygun malzeme seçimi yapılabilir.

Alüminyumun atom numarası 13'tür. Saf halindeki yoğunluğu $2,7 \frac{g}{cm^3}$ 'tür ve $660,2^\circ C$ 'de erimektedir. Kristal yapısı yüzey merkezli kübiktir (YMK) [28]. Çizelge 1.7'de saf alüminyumun özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 1.7 : Saf alüminyumun özellikleri [28].

Özellikler	Değerler
Atom numarası	13
Yoğunluk	$2,7 \frac{g}{cm^3}$
Poisson Oranı	0,34
Ergime Noktası	660,2°C
Termal İletkenlik (0-100°C)	0,57 cal/cms.°C
Kristal Yapısı	Yüzey Merkezli Kübik
Elektrik Direnci (20°C’de)	2,69 $\Omega \cdot cm$

Alüminyumun diğer fiziksel ve mekanik özellikleri incelendiğinde, alüminyum alaşımları içerisinde lxxx serisi alaşımlar yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Düşük çekme mukavemeti yüksek elektrik iletkenliği ile ilişkilendirilebilir. En yaygın iletken alüminyum alaşımı 1350 alaşımıdır ve bu amaçla geliştirilmiştir [2]. Çizelge 1.8’de bazı alüminyum alaşımlarının elektrik iletkenliği ve özdirenç değerleri belirtilmiştir. Elektrik iletkenliği %IACS’ye (International Annealed Copper Standard) göre verilmiştir. %IACS, tavllanmış saf bakırın elektrik iletkenliğini 100 IACS kabul ederek diğer malzemelerin elektrik iletkenliği davranışının buna göre değerlendirilmesini sağlamaktadır [29]. Alüminyum alaşımlarında krom, elektrik direnci üzerine en büyük etkiye sahip alaşım elementlerinden biridir [2].

Çizelge 1.8 : Farklı alaşımların elektrik iletkenliği ve özdirenç değerleri [2].

Alaşım	Temper	Elektrik İletkenliği, 20°C, %IACS, Eşit Hacim	Özdirenç, 20°C, $\Omega \cdot mm^2/m$
1350	Tümü	62	0,028
2011	T3	39	0,045
2014	O	50	0,035
6063	T6	53	0,033
6101	T6	57	0,030
7050	T74	41	0,0415
7075	T6	33	0,0515

Alüminyum, diğer metallerin çoğundan daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Termal iletkenlik, kaynaklanabilirliği en çok etkileyen malzeme özelliğidir. Yüksek termal iletkenlik, alüminyumun kaynak işlemi sırasında ısı girişiindeki dalgalanmalara karşı çok hassas hale getirir. Alüminyum alaşımlarının termal iletkenliği bakıra

nazaran yaklaşık yarısı ve düşük karbonlu çeliğin dört katıdır [2]. Çizelge 1.9’da bazı alüminyum alaşımlarının ısı genleşme katsayısı ve termal iletkenliği verilmiştir.

Çizelge 1.9 : Farklı alaşımların ısı genleşme katsayısı ve termal iletkenliği [2].

Alaşım	Temper	Ortalama ısı genleşme katsayısı, 20°C – 100°C arası, $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$	Termal iletkenlik, 25°C, $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$
1350	Tümü	23,75	234
2011	T3	22,9	151
2014	O	23	193
6063	T6	23,4	218
6101	T6	23,4	218
7050	T74	24,1	157
7075	T6	23,6	130

Spesifik mukavemet, malzemelerin mukavemetinin yoğunluğuna oranı ile temsil edilen bir değerdir. Malzemelerin mukavemeti yoğunluklarına göre kıyaslandığında alüminyum alaşımlarının çok avantajlı olduğu görülebilmektedir [30]. Çizelge 1.10, alüminyum alaşımlarının kendi içerisinde ve diğer malzemelerle spesifik mukavemetinin kıyaslanmasını göstermektedir. Çizelgeden görülebileceği üzere, normalde daha düşük mukavemete sahip olan alüminyum alaşımları, spesifik mukavemet söz konusu olduğunda ön plana çıkmaktadır.

Çizelge 1.10 : Farklı alaşımların çekme mukavemetleri, yoğunlukları ve spesifik mukavemetleri [2].

Malzeme	Çekme mukavemeti, MPa	Yoğunluk, g/cm^3	Spesifik Mukavemet
7075-T6	572,26	2,79	205,11
2024-T361	496,42	2,79	177,93
6061-T6	310,26	2,71	114,49
Paslanmaz Çelik (302)	965,2	8.02	120,35
Karbon Çeliği (1020)	413,68	7,86	52,63
Bakır	220,6	8.91	24,76

Çarpışma performansı, özellikle otomotiv sektöründe önemli isterlerden biridir. Bu isterler firma standartlarında da özel olarak belirtilmektedir. Malzemelere basma testi

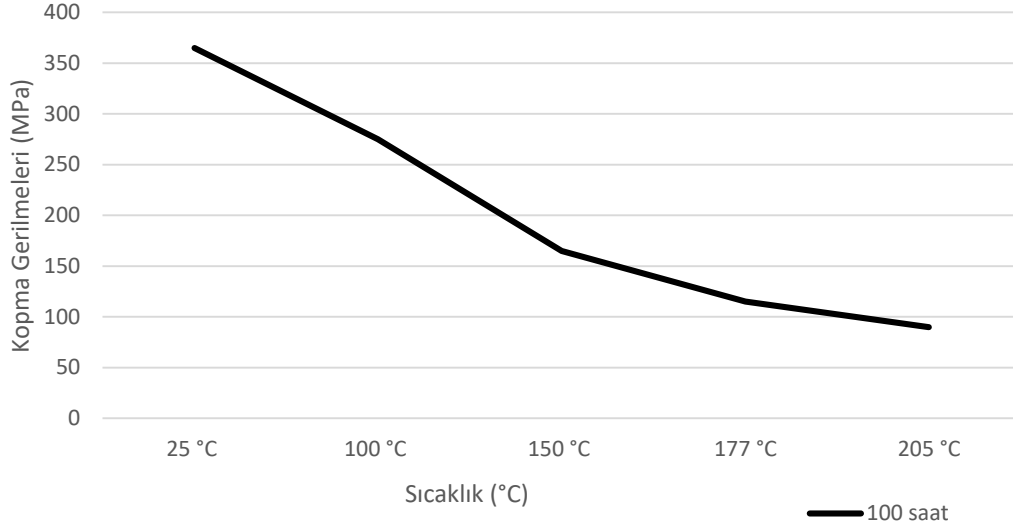
yapılarak çarpışma performansı değerlendirilebilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının basma testi performanslarına göre özellikle 6xxx serisinde diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla daha iyi performans ile karşılaşılmaktadır.

Sertlik, malzemede mekanik anlamda oluşturulan kesilme, çizilme veya aşınmaya karşı direnç olarak tanımlanabilir. Akma mukavemeti, malzemenin elastik deformasyondan plastik deformasyona geçtiği gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır. Çekme mukavemeti ise bir malzemenin kopmadan yüklenebileceği maksimum gerilmeyi tanımlamaktadır. Çizelge 1.11, bazı alüminyum alaşımlarının sertliklerini, akma ve çekme mukavemetlerini göstermektedir. Çizelge yorumlandığında 7xxx ve 2xxx serisi alaşımların bu özelliklerinin diğer alaşımlara nazaran daha yüksek olduğu görülebilmektedir.

Çizelge 1.11 : Bazı alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri [2].

Alaşım-temper	Çekme dayanımı,	Akma dayanımı,	Sertlik, HB
	MPa	MPa	
1060-0	70	30	19
1100-H18	165	150	44
2011-T8	405	310	100
2024-T361	495	395	130
6061-T6	310	275	95
6101-T6	220	195	71

Sürünme dayanımı, sabit sıcaklık ve sabit yük altında malzemede meydana gelen plastik deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık ve yük arttıkça sürünme dayanımı da giderek azalmaktadır. Şekil 1.6'da 2011-T3 ısıtım işlemi kondisyonundaki 100 saat sabit yüke maruz kalmış alaşımın artan sıcaklık karşısındaki kopma gerilme değişimi gösterilmektedir.



Şekil 1.6 : 2011-T3 alaşımasının 100 saat boyunca sabit yük altında artan sıcaklığa göre kopma gerilme değişimi [31].

Kırılma tokluğu K_{IC} , çatlaklı malzemelerin gevrek kırılmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır ve kırılma mekaniğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Alüminyum alaşımlarında uygulanan prosesler ve mikro yapı kırılma tokluğunu etkilemektedir. Çizelge 1.12’de bazı sert alaşımların kırılma toklukları verilmektedir.

Çizelge 1.12 : Bazı alaşımların kırılma tokluğu değerleri [32,33].

Alaşım-Temper	K_{IC} , MPa m ^{1/2}
2011-T6	27
2014-T6	20
2024-T851	21
2124-T851	26
7075-T7351	31
7079-T651	27

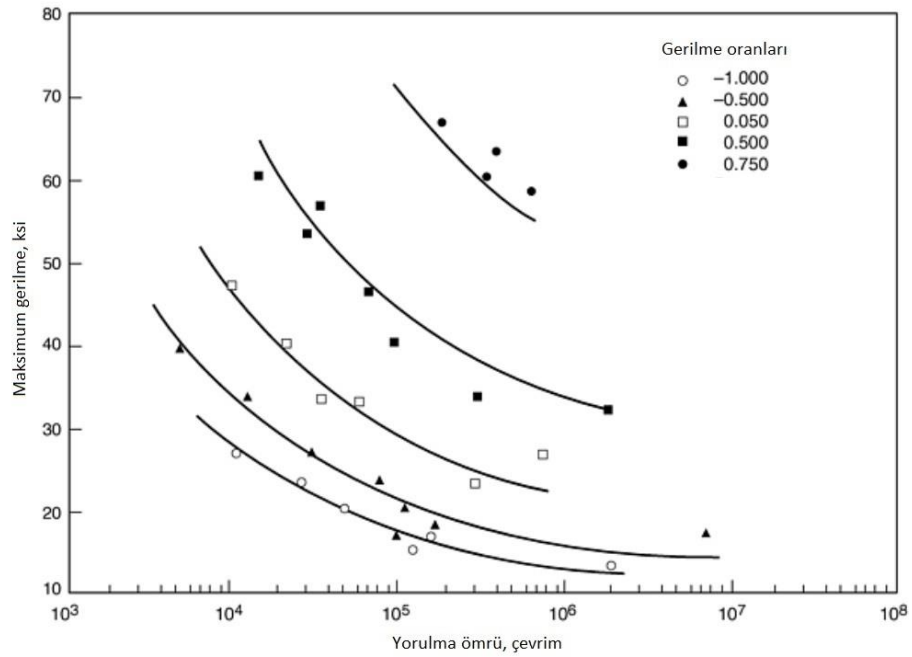
Kırılma tokluğunu etkileyen değerlerden biri de su verme hızıdır. Düşük su verme hızları kırılma tokluğunu düşürmektedir. Alaşım içerisindeki Fe, Si, Mn ve Cr gibi safsızlık elementlerinin yüksek oranda bulunması da kırılma tokluğunu düşürmektedir. Mikro yapıdaki büyük tane boyutlarının da kırılma tokluğuna olumsuz etkisi bulunmaktadır. Yetersiz ve doruk yaşlandırma şartlarında malzemelerde artan kırılma tokluğu görülmekle beraber, aşırı yaşlandırma altında kırılma tokluğu azalmaktadır [32].

Yorulma dayanımı, malzemelerin zıt yükler altında gösterdiği dayanım olarak tanımlanmaktadır. Bazı alüminyum alaşımlarının zıt yükler altında 500.000.000 çevrim sonucunda elde edilmiş yorulma dayanımları Çizelge 1.13’te gösterilmiştir.

Çizelge 1.13 : Bazı alaşımların yorulma dayanımı değerleri [32].

Alaşımlar-Temper	Yorulma dayanımı, MPa
1060-O	20
2011-T3	125
2014-T4	140
6061-T4, T6	95
7075-T6	160

SN (Wöhler) Eğrisi, malzemelere uygulanan gerilme genliğinin hasarın meydana geldiği çevrim sayısına karşılık oluşturulduğu bir eğridir. Yorulma davranışının anlaşılmasında çok yaygın kullanılmaktadır. 2219-T85 alüminyum alaşımından farklı gerilme oranlarında oluşturulan S-N eğrisi Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 : 2219-T85 alüminyum alaşımının S-N (Wöhler) Eğrisi [32].

Alüminyum, oluşturduğu doğal Al_2O_3 tabakasından dolayı atmosferik koşullar altında korozyona karşı dirençlidir. Ancak yine de galvanik korozyon, oyuklanma korozyonu ve tanelerarası korozyon alüminyum ve alaşımlarında sık karşılaşılan korozyon türlerindendir. Eloksal kaplama, alüminyum yüzeyini alüminyum okside (Al_2O_3)

dönüştürmenin elektrokimyasal bir yöntemidir [17]. Farklı ürünlerde sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci, manyetizma, termal yayım gibi amaçlarla kaplamalar yapılabilmektedir [18]. Alüminyum, titanyum ve magnezyum dahil olmak üzere birçok metal anodize edilebilmesine rağmen, yalnızca alüminyum eloksal endüstride yaygın kullanım alanı bulmuştur. Kaplamaları üretmek için asitlerden faydalanılmaktadır ve en yaygın kullanılanlar sülfürik (H_2SO_4) ve kromik (CrO_3) asitlerdir [17].

1.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması döküm ve dövme alaşımları olarak iki temel kategoride gerçekleştirilmektedir. Döküm alaşımları isimlendirilirken dört haneli numerik tanımlamalar kullanılmaktadır [2]. Bu dört hanenin ilk hanesi alüminyum alaşımının temel alaşım elementini temsil etmektedir. Çizelge 1.14'te döküm alaşımları ve temel alaşım elementleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.14 : Döküm alaşımlarının isimlendirilmesi [2].

Alaşım kategorisi	Temel alaşım elementi
1xx.x	-
2xx.x	Cu
3xx.x	Si + Cu ve/veya Mg
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	Kullanılmayan seriler
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	Diğer elementler

Alüminyum dövme alaşımları isimlendirilirken benzer şekilde dört haneli numerik tanımlamalar kullanılmaktadır ve ilk hane temel alaşım elementini temsil etmektedir. Çizelge 1.15'te dövme alaşımları ve temel alaşım elementleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.15 : Dövme alaşımlarının isimlendirilmesi [2].

Alaşım kategorisi	Temel alaşım elementi
1xxx	-
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg ve Si
7xxx	Zn
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan seriler

Bazı alüminyum alaşımları çökelme sertleştirme yöntemi ile mukavemetlendirilebilmektedir. 2xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx bu yöntemle mukavemet kazandırılabilen alüminyum alaşımlarıdır. Ayrıca bu alaşımlar ekstrüzyonla şekillendirilebilen alaşımlardandır.

Alüminyum ekstrüzyonu, biyetlerin belirli sıcaklığa ısıtılarak bir kalıp içerisinde pres yardımıyla basılması ile gerçekleştirilmektedir. Isıtmanın gerçekleştirilmesi ile plastik deformasyonun daha kolaylaşması ve pres basıncının düşürülmesi sağlanmaktadır. Tipik bir ekstrüzyon tesisinde yaklaşık 7 metrelik homojenize edilmiş kütükler 0.66-1.83 m boyutunda kısa biyetlere kesilir, kesilen biyetler 400-550°C aralığında ön ısıtılır ve preste basılır. Sonrasında, üretilen profiller uygun boylarda kesilir. Isıl işlem uygulanabilen alaşımlara kalıp çıkışında su spreyi ile su verme işlemi gerçekleştirilebilir. Ekstrüde edilen profiller sonraki adımda yapay yaşlandırma, eloksallama ve boyama işlemlerine tabi tutulabilmektedir [34]. Ekstrüzyon presleri 2xxx ve 7xxx serisi gibi sert alaşımların da ekstrüzyonunu gerçekleştirebilecek kapasitededir [14].

1.5 Alüminyum Alaşımlarında Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alüminyum alaşımlarında kullanılan elementlerin alaşımın özelliklerine farklı etkileri bulunmaktadır.

Bor, alüminyum ve alaşımlarında katılaşma sırasında tane inceltici olarak kullanılmaktadır. Titanyum ile birlikte kullanıldığında daha efektif olmaktadır. Ticari tane inceltici olarak genellikle AlTi₅B kullanılmaktadır [2].

Kadmiyum, düşük ergime sıcaklığına sahip elementlerden bir tanesidir. Alüminyum-bakır alaşımlarına %0.3 oranında katılarak yaşlandırmayla sertleştirme işlemine katkı sağlamaktadır [2].

Karbon, Al_4C_3 impüritesi oluşturarak yüzeyde oyuklanmaya sebep olabilmektedir [2].

Krom, alüminyum alaşımlarında elektrik direncini artırmaktadır. Ayrıca tane yapısını kontrol etmek için Al-Mg-Si ve Al-Zn alaşımlarında sıcak şekillendirme sırasında meydana gelen rekristalizasyonu engellemek için kullanılmaktadır. Alüminyum içerisindeki maksimum çözünürlüğü %0,77'dir [2].

Bakır, 2xxx serisinin ana alaşım elementidir ve alüminyum ile Al_2Cu fazı oluşturarak çökelti sertleşmesi mekanizmasını aktifleştirmektedir. Bu sayede yüksek mukavemet ve sertlik eldesi mümkün olmaktadır. Alüminyum-bakır alaşımlarına magnezyum eklenmesinin temel faydalarından biri, çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra daha mukavim alaşım elde edilmesidir. Bu alaşımlara 2xxx serisinden 2002 ve 2036 alaşımları örnek olarak verilebilir [2].

Hidrojen, sıvı halde daha yüksek çözünürlüğe sahiptir. Bu yüzden katılaşma sırasında poroziteye sebep olabilir. Ergiyik içerisindeki hidrojen seviyesi flakslama ile veya vakumda gaz giderme işlemi ile kontrol edilmektedir [2].

Demir, alüminyum içerisinde en çok rastlanan impürite elementidir. Demirin alüminyum içerisinde katı halde çözünürlüğü %0,052'dir yani oldukça düşüktür. Bu yüzden demirin çoğu alüminyum içerisinde intermetalik ikincil faz olarak bulunmaktadır. Ayrıca bir seviyeye kadar iyi sürünme özelliği sağlamaktadır [34].

Kurşun, ticari alüminyum alaşımlarında normalde eser miktarda bulunmaktadır. 2011 ve 6262 gibi alaşımlarda ise işlenebilirliği artırmak adına bizmut ile birlikte kullanılmaktadır. Döküm sırasında segregasyon eğilimi göstererek termal gerilme çatlamasına sebep olabilmektedir. Kurşun, çelik malzemelerin de kesme mukavemetini azaltmada ve kırılması kolay talaşlar üretmede manganez sülfüre benzer şekilde davranmaktadır. Kurşun bileşikleri toksiktir [2,35]. Toksik özelliğinden dolayı kurşunsuz işlenebilir alüminyum alaşımları üzerine de çalışmalar mevcuttur [36].

Lityum, 8xxx alaşımlarının ana alaşım elementidir. Oluşturduğu $LiAl_3$ fazı ile birlikte çökelti sertleşmesi mekanizmasını aktifleştirmektedir. Ayrıca lityum, nemli

ortamlarda alüminyum folyoda mavi korozyona sebep olabilmektedir. Alüminyum içerisindeki maksimum çözünürlüğü %4'tür [2].

Magnezyum, 5xxx serisi alaşımların ana elementidir. Alüminyum içerisindeki en yüksek çözünürlüğü %17,4'tür. Ancak dövme alaşımlarında %5,5'i aşmamaktadır. Mg_5Al_3 ve Mg_5Al_8 fazları oluşturarak tane sınırlarında çökelmektedir. Magnezyum, alüminyum alaşımlarının mukavemetini, tokluğu düşürmeden kayda değer derecede artırabilmekte ve yoğunluğu düşürmektedir. Korozyon direnci ve kaynaklanabilirliğe de olumlu etki etmektedir. Magnezyum, silisyum ile birlikte 6xxx serisi alaşımların da ana alaşım elementi olmaktadır. 6xxx alaşımları çökelti ile sertleştirilebilmektedir. Buradaki ana çökelti fazı ise Mg_2Si fazıdır [2].

Manganez, primer alüminyumda yaygın impüritelerden biridir. Özdirence olumsuz, mukavemete ise olumlu etkisi vardır. Sıcak deformasyon sırasında rekristalizasyon sıcaklığını artırmaktadır. Manganez çökeltileri, ısıtılma işlemi uygulanabilen alaşımlarda su verme hassasiyetini artırmaktadır. Alüminyum içerisindeki en yüksek çözünürlüğü %1.82'dir [2].

Nikelin alüminyum içerisindeki katı çözünürlüğü %0.04'ü aşmamaktadır. Bu seviyenin üzerinde demir ile birlikte intermetalik bileşik oluşturmaktadır. Mukavemeti artırırken tokluğu düşürmektedir. Nikel ayrıca 1100 alaşımında oyuklanma korozyonunu tetiklemektedir [2].

Kalay, magnezyum içeren alüminyum alaşımlarında kullanıldığında işlenebilirliği artıran bir elementtir. Mg_2Sn fazı meydana getirir. Ağırlık olarak %1'in üzerinde kalay kullanımı alaşımın işlenebilirliğini artırmaktadır [36].

Silisyum, ısıtılma işlemi uygulanabilen 6xxx serisi alaşımlarında magnezyum ile birlikte Mg_2Si fazını oluşturmaktadır. %23'e kadar silisyum içeren hiperötektik döküm alaşımları aşınma uygulamalarında kullanılmaktadır. %5 civarında silisyum içeren alaşımlar eloksallama işleminden sonra siyah renk almakta ve görsel amaçla kullanılmaktadır [2].

Alüminyum-bakır alaşımlarında az miktarda kalay kullanılması çözeltiye alma işleminden sonra gerçekleştirilen yapay yaşlandırma reaksiyonunu önemli ölçüde artırmaktadır [2].

Titanyum, alüminyumdaki elektrik iletkenliğini olumsuz etkilememektedir. Alüminyum döküm alaşım ve ingotlarında tane inceltici olarak kullanılmaktadır. Alüminyum içerisindeki en yüksek çözünürlüğü %1'dir [2].

Çinko, ısıtıl işlem görebilen dövme alaşımlarından olan 7xxx serisinin ana alaşım elementidir. $MgZn_2$ fazı oluşturarak çökelme sertleşmesi mekanizmasını aktifleştirmektedir. Alüminyum içerisindeki maksimum çözünürlüğü %82,8'dir. Dövme alaşımları içerisinde alüminyum-çinko alaşımları en iyi mukavemeti göstermektedir. Ticari olarak kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [2].

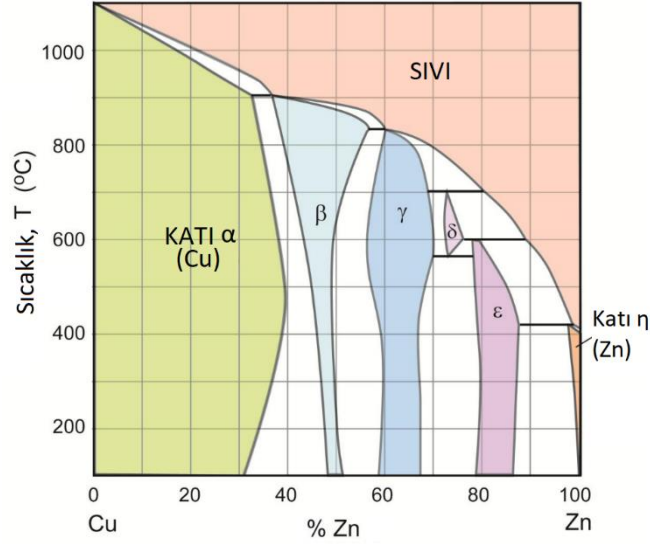
Zirkonyum, alaşım içerisine %0,1-0,3 aralığında eklenerek toparlanmayı ve kristalleşmeyi engelleyen ince bir intermetalik çökelti oluşturmak için kullanılmaktadır. Alüminyum içerisindeki maksimum çözünürlüğü ise %0,28'dir [2].

1.6 Pirinç Alaşımları

Bakır-çinko (Pirinç) alaşımları yüksek korozyon direnci, iyi işlenebilirliği, iyi aşınma direnci [39], yüksek termal ve elektrik direnci [39] sayesinde endüstride tercih edilmektedir [40]. Elektrik endüstrisi, otomotiv ve valf imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. İyi işlenebilirliğin sağlanabilmesi için alaşım içerisine kurşun elementi katılmakta, en iyi işlenebilirlik ise ağırlıkça en fazla %3 değerinde kurşun ile sağlanmaktadır [39]. %60'tan fazla bakır içeriği yüksek şekillendirilebilirlik sağlayarak soğuk işlem uygulamalarını kolaylaştırmaktadır [40].

Kurşunlu pirinç alaşım rod çubukları ekstrüzyon yöntemi ile üretilmektedir [40]. Mikro yapısal olarak incelendiğinde, kurşunlu ve kurşunsuz pirincin mikro yapıları birbirine benzerdir [40].

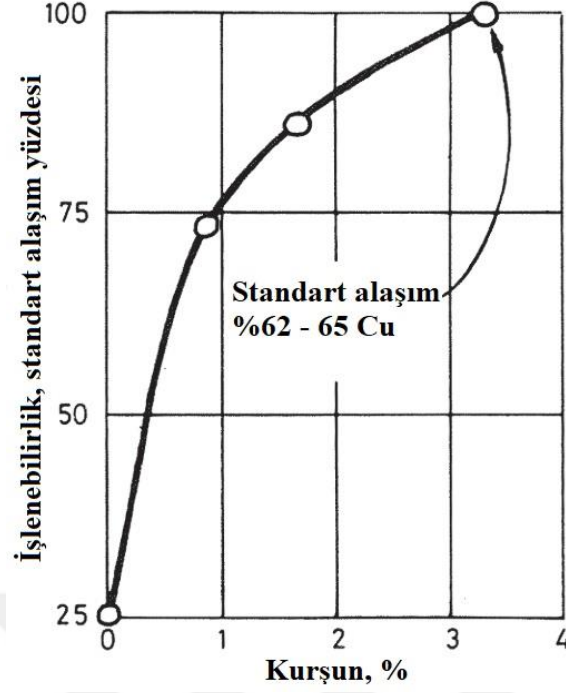
Kurşun, bakır içerisinde çözünmemektedir [40]. Şekil 1.8'de Cu-Zn faz diyagramı gösterilmektedir. %40 Zn içeren alaşımda 900°C'ye kadar mikro yapıda α ve β fazı gözlemlenmektedir [41]. Bu fazlar içerisinde kurşun çözünmemekte ve tane sınırları boyunca yayılmaktadır. Kurşunun tane boyutu 5 μm ve altında oldukça dağılım daha homojen gerçekleşmektedir. Bu sayede talaş kaldırma işlemi daha kolay hale gelmekte ve işlenebilirlik artmaktadır [40]. Bakır içeriği zengin α fazı yüzey merkezli kübik kristal yapıdadır ve oda sıcaklığında yüksek sıcaklıklara nazaran daha iyi şekillendirilebilirliğe sahiptir. Öte yandan, çinko içeriği daha zengin β fazı hacim merkezli kübik yapıya sahiptir, α fazından daha serttir ve yüksek sıcaklıkta daha sünekler [42].



Şekil 1.8 : Cu-Zn faz diyagramı [41].

Kurşun içeren pirinç alaşımlarından imal edilen gaz valflerinin üretiminde birtakım problemlerle karşılaşmak da mümkündür. Üretim adımları temel olarak yarı-sürekli döküm, sıcak ekstrüzyon, soğuk çekme, sıcak dövme ve işleme olarak belirtilebilir [40,43]. Döküm işlemi sırasında pirinç biyetinde yüzey hataları, kurşun kümelenmesi, çinko segregasyonu, çukurlar ve boşluklar, metalik olmayan inklüzyonlar gibi hatalar meydana gelebilmektedir. Bu hatalar döküm parametrelerine, safsızlıklara ve geri dönüşüm malzemesi kullanım oranına bağlıdır [43]. Ekstrüzyon ve soğuk çekme işlemleri sırasında yüzey çatlakları ve sıcak yırtılma hataları ile karşılaşmak mümkündür [40,43].

Pirinç alaşımlarının mekanik özellikleri genel olarak çinkoya bağlı olsa da, Pb, Mn, Sn, Al, Fe, Si ve Ni ilavesi çekme mukavemetini, işlenebilirliğini ve korozyon dayanımını etkilemektedir [42]. Şekil 1.9’da Pb yüzdesine göre alaşımların işlenebilirliği bağli olarak gösterilmiştir. Ek olarak, yüksek işlenebilirliğe sahip pirinç alaşımları işleme sırasında küçük ve kolayca kırılan talaş üretmektedir [35]. Bu talaşlar malzemenin işleme takımına sıvanmasını engellemekte, işlenebilirlik kabiliyetini artırmaktadır.



Şekil 1.9 : Pirinç alaşımlarında kurşun içeriğine göre işlenebilirliğin değişimi [35].

Valf üretiminde kullanılan [44] ve yüksek işlenebilirliğe sahip pirinç alaşımlarından biri olan CuZn40Pb3 (ASTM gösterimi: C38500) alaşımının içerdiği elementler Çizelge 1.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 1.16 : CuZn40Pb3 alaşımının kimyasal bileşimi [37].

Alaşım no.	Cu	Pb	Fe
C38500	55,0 – 59,0	2,5 – 3,5	0,35

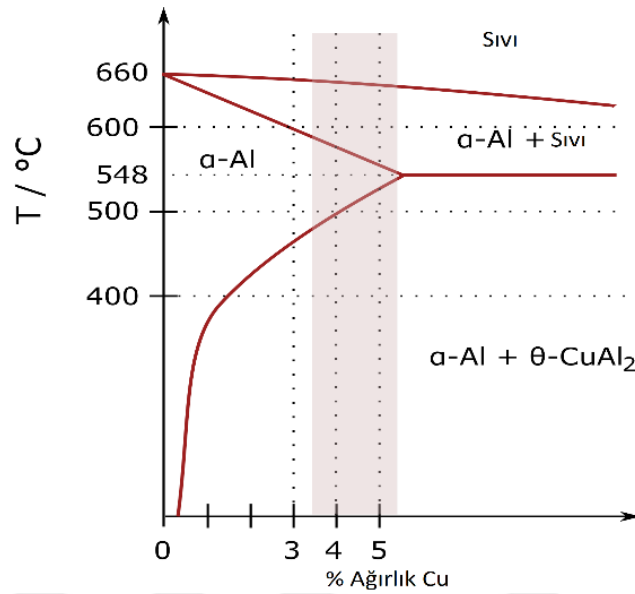
CuZn40Pb3 alaşımının özellikleri Çizelge 1.17’de gösterilmiştir. Çizelgedeki özelliklere ek olarak, alın kaynağına orta derecede yatkınken, diğer kaynak prosesleri bu alaşım için önerilmemektedir [37].

Çizelge 1.17 : CuZn40Pb3 alaşımının özellikleri [37].

Özellikler	Değerler
Yoğunluk	$8.47 \frac{g}{cm^3}$
Elastik Modül	97 GPa
Akma Mukavemeti	140 MPa
Çekme Mukavemeti	415 MPa
Kayma Mukavemeti	240 MPa
% uzama	30
Isıl İletkenlik	$123 \frac{W}{m \cdot K}$
Brinell Sertliği	65 HRB
Soğuk Şekillendirme	Kötü

1.7 2xxx Alaşımları

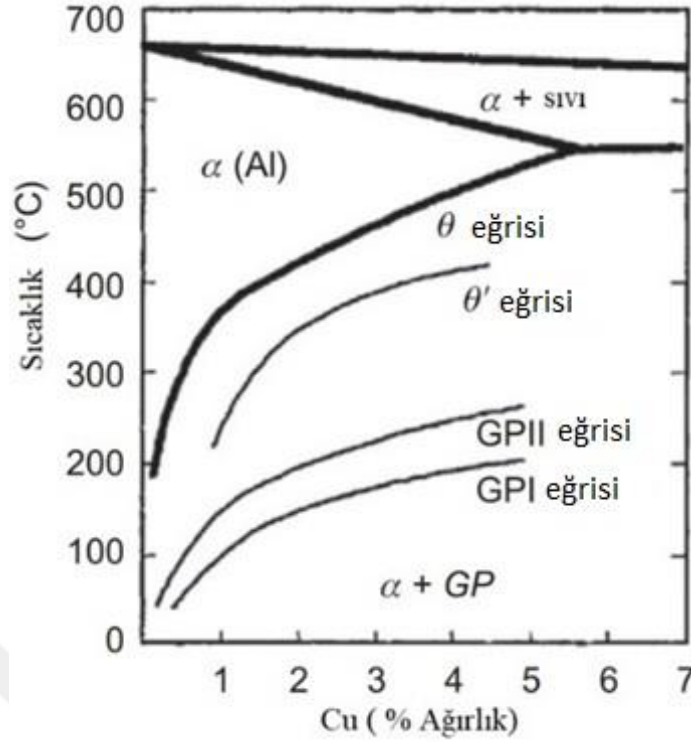
Bakır, alüminyum alaşımları için iyi bir çökelme sertleşmesi yapıcı ajandır. 2xxx serisi alüminyum alaşımlarının da ana alaşım elementidir. Bakırın alüminyum içerisinde maksimum çözünübilirliği %5,65'tir [2] ve Al_2Cu fazı oluşturmaktadır. Şekil 1.10'da Al-Cu faz diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.10 : Al-Cu faz diyagramı [45].

Al-Cu alaşımları çökelme sertleşmesinin irdelenmesi için en çok kullanılan alaşımlardandır. Yaşlandırma sırasında meydana gelen çökelme işlemi yaşlandırma sıcaklığına ve aşırı doygunluk seviyesine bağlıdır. Fazların çökelme sırası: aşırı doygun katı çözelti – GP Bölgeleri – θ'' – θ' – θ şeklinde olmaktadır [38].

Guinier-Preston (GP) bölgeleri [46], yapay yaşlandırmanın veya uzun süreli doğal yaşlandırmanın ilk aşamasında meydana gelen, Cu atomlarının kümелendiği bölgelerdir. GP bölgeleri nispeten düşük sıcaklıklarda kararlıdır. Yaşlandırma işlemi yüksek sıcaklıkta yapıldığında alüminyum matris içerisinde yeniden çözünme eğilimindedir. GP bölgeleri, θ'' ve θ' fazları yarı kararlı fazları; θ fazı ise Al-Cu alaşımlarının denge fazı durumundadır [38]. Şekil 1.11, bu fazların solvüs sınırlarını Al-Cu faz diyagramında göstermektedir.



Şekil 1.11 : Al-Cu alaşımlarındaki fazların solvus sınırlarının ikili faz diyagramında gösterilmesi [46].

2xxx serisi alaşımlarda yukarıda bahsedilen fazların yanında farklı fazlar da bulunmaktadır. Çizelge 1.18’de bu fazlar ve bileşimleri belirtilmiştir.

Çizelge 1.18 : 2xxx alaşımlarında gözlemlenen bazı fazlar ve bileşimleri [38].

Fazlar	Kimyasal Bileşim
θ'	Al_2Cu
θ	Al_2Cu
S	Al_2CuMg
Ω	Al_2Cu
T	Al_6CuMg_4

2xxx serisi Al-Cu alaşımları içerdikleri diğer alaşım elementlerine göre alt gruplara ayrılmaktadır. 2024 ve 2014 alaşımları uçak gövdesinde kullanılan 2xxx serisi alaşımlardandır [14]. 2011 alaşımı ise içerisindeki Pb ve Bi içeriğinden dolayı kolay talaşlı işleme özelliğine sahiptir. 1930’lu yıllarda geliştirilmiştir ve kullanımı halen devam etmektedir [14]. 2219 alaşımı ise yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmakla beraber iyi kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptir. 2618 alaşımı ise Mg, Fe ve Ni ile kaba ve kararlı taneler meydana getirmekte ve 200°C’ye kadar iyi mukavemet göstermektedir [14]. Çizelge 1.19’da 2xxx serisi alüminyum alaşımlarının bir kısmının EN 573-3 standardına göre kimyasal bileşimleri gösterilmiştir.

Günümüzde uçaklarda da yaygın olarak kullanılıp ‘‘Duralumin’’ olarak bilinen, kimyasal bileşiminde %3,5-5,5 bakırla birlikte magnezyum ve manganez bulunduran (2xxx serisi) alaşımı icat eden Alman Metalurjist Alfred Wilm, 1901 yılında Neubabelsberg'de askeri araştırma merkezinde alüminyum alaşımlarının çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) özelliğini keşfetmiştir [47].

2xxx serisi alaşımlar, oyuklanma, tanelerarası korozyon, gerilme korozyon çatlaması gibi korozyon türlerine duyarlıdır. Bu duyarlılığa alaşım içerisindeki bakır bakımından zengin Al_2Cu , Al_2CuMg , Al_7Cu_2Fe gibi intermetaliklerin varlığı sebep olmaktadır [48].

Tanelerarası korozyonda intermetalik fazlar tane sınırına yerleşmekte, tane sınırına yakın bölgelerde (~200 nm) ise bakır açısından fakir bölgeler (%1.6-%1.8) ortaya çıkmaktadır. Matris konsantrasyonunun yaklaşık üçte biri kadar bakır içerdiğinden bu bölgelerde açık hücre oluşumu gerçekleşmektedir. Tanelerarası korozyon bu mekanizma temelinde yayılım göstermektedir. Ayrıca, 2xxx serisi alaşımlar ısıtılıp işlemle sertleştirilebildiklerinden, farklı ısıtılma koşulları da korozyon oluşumunu ve ilerlemesini etkilemektedir [48].

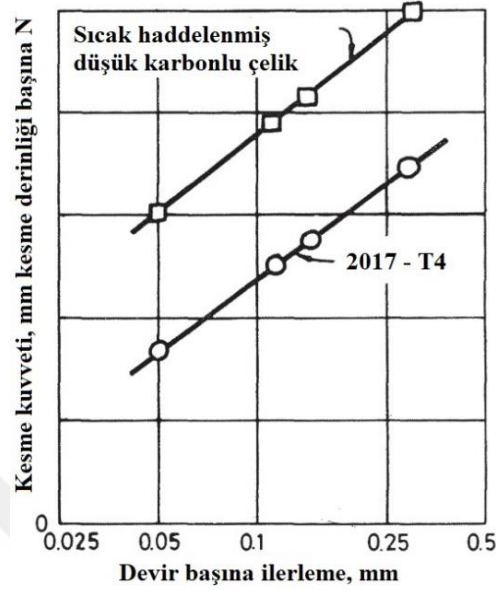
Korozyon direnci tane boyutu, tane morfolojisi, çöktelti ve çöktelti tane sınırındaki dağılımından etkilenmektedir [11]. 2014, 2024, 2019 gibi 2xxx serisi Al-Cu alaşımlarının T3 ve T4 ısıtılma koşulunda gerilmeli korozyona karşı direnci düşüktür. Alaşımlar daha uzun sürelerde ısıtılarak T6 ve T8 ısıtılma koşuluna ulaştıklarında çöktelti daha homojenleşmekte ve gerilmeli korozyon direnci artmaktadır [32].

Çizelge 1.19 : 2xxx serisi Al-Cu alaşımlarının kimyasal bileşimleri.

Alaşım	Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Ti, %	Notlar
2011	0,4	0,7	5-6	-	-	-	0,2-0,6 Bi; 0,2-0,6 Pb
2024	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,15	Zr + Ti limit: 0,2
2014	0,5-1,2	0,7	3,9-5	0,4-1,2	0,2-0,8	0,15	Zr + Ti limit: 0,2
2219	0,2	0,3	5,8-6,8	0,2-0,4	0,02	0,02-0,1	0,10-0,25 Zr

Çekme mukavemeti 440 MPa olan 2017-T4 alüminyum alaşımı benzer mekanik özelliklere sahip ve çekme mukavemeti 440 MPa olan sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çelik ile kıyaslandığında çok daha düşük kesme kuvveti ile işlenebilmektedir [35]. Şekil 1.12’de devir başına ilerlemenin kesme kuvvetine etkisi gösterilmektedir.

Buradan 2017-T4 alaşımının aynı devir başına ilerlemede daha düşük kesme kuvvetine ihtiyaç duyduğu görülebilmektedir.



şekil 1.12 : Devir başına ilerlemenin kesme kuvvetine etkisi [35].

2xxx serisi alaşımların kolay işlenebilirliğe sahip olduğuna dair patentler de mevcuttur. Bartges ve diğ, 2000 yılında aldığı US6113850A patent numaralı “2xxx Series Aluminium Alloy” isimli patentte 2xxx serisi alaşımların kolay işlenebilir olduğundan, bu tarz uygulamalarda rahatlıkla kullanılabileceğinden bahsetmektedir [49].

1.8 2011 Alaşımı

Kimyasal kompozisyonundaki Pb ve Bi içeriği sayesinde iyi işlenebilirliğe sahip 2011 alaşımları, bu özelliği ile cıvata makinesi ürünlerinde, aygıt parçalarında, otomotiv, elektronik, bağlantı elemanlarında, makine parçalarında, doğalgaz valflerinde kullanılmaktadır.

Bizmut ve kurşun gibi düşük ergime noktasına sahip metaller, kolay işleme yapılabilmesi için alüminyum içerisine katılmaktadır. Bu metaller katı alüminyum içerisinde sınırlı çözünürlüğe sahiptir ve yumuşak, düşük ergime noktalı bir faz oluşturarak talaş kaldırılmasını kolaylaştırır, kesici takımın yağlanmasına yardımcı olur. Bizmutun bir diğer avantajı da, katılaşma sırasındaki genleşmesi ile kurşunun bzşmesini telafi etmesidir. 2011 alaşımlarında 1:1 oranında kurşun-bizmut kullanılmaktadır [2].

Yüksek mukavemetli 2011 alüminyum alaşımları yüksek devirde ve yüksek takım hızında işlenebilmekte ve mükemmel yüzey elde edilebilmektedir. Bu yüzden bu alaşımlar yüksek işlenebilirliğe ihtiyaç duyulduğunda tercih edilmektedir [2].

Alüminyum alaşımlarında kesme kuvveti düşüktür ve 30-60 m/dk aralığındadır. Yüksek devirde kesme kuvveti diğer alüminyum alaşımlarında azalırken, 2011-T3 kondisyonundaki alaşımda artmaktadır [2]. Çizelge 1.20’de TS EN 755-2 standardına göre 2011 alaşımının T4 ve T6 termiğindeki minimum mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.20 : 2011 alaşımının T4 ve T6 termik kondisyonundaki mekanik özellikleri.

Temper	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Yüzde uzama (%) min	Sertlik
T4	275	125	14	95
T6	310	230	6	110

2011 alaşımının özellikleri Çizelge 1.21’de gösterilmiştir. 2011-T6 ve CuZn40Pb3 alaşımının özellikleri kıyaslandığında T6 termik kondisyonundaki 2011 alaşımının akma mukavemetinin CuZn40Pb3 alaşımına kıyasla %64 daha yüksek olduğu, sertlik değerinin ise %69 daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine aynı koşullarda 2011 alaşımının çekme mukavemetinin %33 daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 1.21 : 2011 alaşımının özellikleri [50,51].

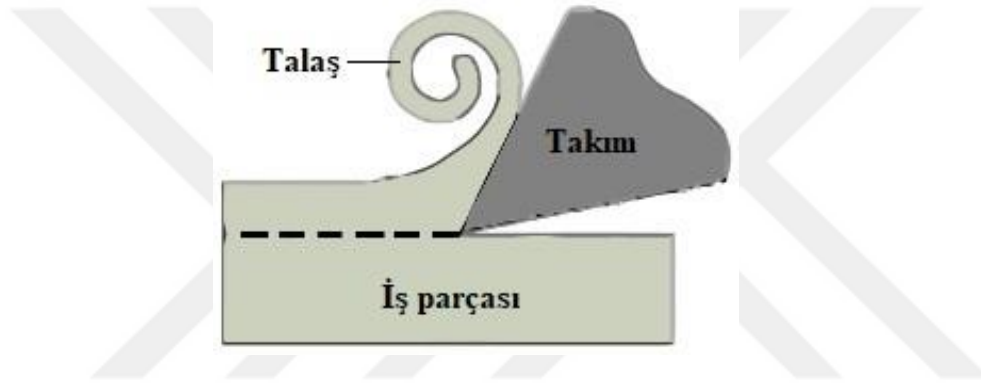
Özellikler	Değerler
Yoğunluk	$2,82 \frac{g}{cm^3}$
Elastik Modül	70-80 GPa
Akma Mukavemeti	230 MPa
Çekme Mukavemeti	310 MPa
% uzama	8
Isıl İletkenlik	$138 \frac{W}{m \cdot K}$
Brinell Sertliği	110 HRB
Soğuk Şekillendirme	Orta
Sıcak Şekillendirme	Çok iyi

1.9 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, malzemelerin kesici alet kullanılarak işlenebilmesinin kolaylığını veya zorluğunu anlatan bir malzeme özelliğidir [35].

İşlenebilirliğin ölçülmesi zor olduğundan, harflerden oluşan kıyaslama sistemi kullanılmaktadır. A, B, C, D ve E harfleri bu karakteristiği belirlerken A en iyi işlenebilirliğe sahip malzemeyi, E ise en kötü işlenebilirliğe sahip malzemeyi ifade etmektedir. Bu harfler birtakım parametreler göz önüne alınarak belirlenmektedir. Bu parametreler temel olarak talaş boyutu, takım aşınması, yüzey işlem, işleme gücü, mekanik ve korozyon özellikleridir [49].

Kesme düzlemi teorisi, talaşın işleme sırasında kesme yönüne eğimli ardışık kesme düzlemleri boyunca kırılma yoluyla oluştuğunu öne sürmektedir [35]. Kesici takım ile uygulanan yüksek normal kuvvet ile iş parçasının ön yüzü yukarı hareket ettirilir ve bu sayede talaş oluşur. Şekil 1.13'te talaş oluşumu örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.13 : Talaş oluşumu [52].

İşlemeyi basitleştirdiğinden ve takımlardan ısının uzaklaştırılmasını kolaylaştırdığından malzemeden küçük talaş boyutlarının kaldırılması tercih edilmektedir. Talaşlar çok küçük de olmamalıdır. Çok küçük talaşlar kesme ve delme işlemleri sırasında yağlayıcıların dolaşımını engelleyebilmektedir. Uzun, ince talaşlar ise kırılmak yerine kendi etrafında kıvrılmaktadır ve yağlayıcıyı bloke edebilmektedir [49].

Takım malzemesi işlenebilirlik açısından önemli olmakla beraber birtakım mekanik ve metalürjik gereksinimleri mevcuttur. Bunlar kesme sıcaklıklarında yüksek akma mukavemeti, yüksek kırılma tokluğu, yüksek aşınma direnci, yüksek yorulma direnci, yüksek termal kapasite ve termal iletkenlik, iş parçası içerisinde düşük çözünürlük, yüksek termal şok direnci ve yüksek oksidasyon direnci olarak sıralanabilir. Elmas, SiC, WC, ZrO₂, Al₂O₃ gibi yüksek akma mukavemetine sahip malzemeler takım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kolay işlenebilir malzemelerin takım malzemelerini aşındırmaması beklenir. Dolayısıyla bu malzemelerde ekonomik

sebeplerden dolayı düşük aşınma oranları tercih edilmektedir. Düşük aşınma oranı üretim performansını artırırken takım değişiminden kaynaklanan durma süresini de kısaltmaktadır [49,35].

İşlenmiş halde pürüzsüz bir yüzey kalitesine sahip olan alaşımlar, taşlama ve çapak alma gibi sonraki yüzey bitirme işlemlerine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırması veya azaltması sebebiyle tercih edilmektedir [49].

Düşük işleme kuvvetleri tercih edilmektedir. Bu durum enerji ve güç gereksinimlerini azaltacak, dolayısıyla oluşacak sürtünme kaynaklı sıcaklıklar da görülmeyecektir [49].

Malzeme türlerine göre kesme hızları ve çaplara göre ilerleme Çizelge 1.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.22 : Malzeme türlerine göre kesme hızları ve çaplara göre ilerleme [53].

Malzeme	Kesme Hızı (Vc) (m/dk)	Ø12 – Ø16 Çapına Göre İlerleme
Alaşımlı Çelikler	50 – 80	0,15 – 0,28
Alüminyum – Dövme	50 – 350	0,35 – 0,50
Bakır-Pirinç-Bronz	60 – 200	0,25 – 0,40
Titanyum Alaşımları	20 – 40	0,10 – 0,16
Sertleştirilmiş Malzemeler	25 – 35	0,12 – 0,15

Alüminyum döküm alaşımları içerisinde ana alaşım elementi silisyum olan alaşımlar en önemli grubu oluşturmaktadır. Bu alaşımlar sert aşındırıcı silisyum taneleri içermektedir ve bu taneler takımlarda aşınma problemlerine sebep olmaktadır.

2xxx serisi Al-Cu alaşımları diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla çok daha iyi işlenebilirliğe sahiptir [35] ve 2011 alaşımı işleme alaşımları içerisindeki A sınıfındaki alaşımlardan biridir [49].

1.10 Konuyla İlgili Son Dönemde Yapılan Çalışmalar

Koch S. ve Antrekowitsch H., 2011 yılında yaptıkları çalışmada kurşun içermeyen yüksek işlenebilirliğe sahip alüminyum alaşımlarını incelemiştir. Kurşun içermeyen bu alaşımlara talep giderek artmaktadır. Avrupa Birliği’nin yaptığı yönergeler ile kurşundan kaçınmaya çalışılması da bu talebi etkilemektedir. Kurşunun ticari alaşımlardaki içeriğini azaltmaya çalışmakla beraber yerini alabilecek ikame

elementler üzerine de çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Çalışmada kurşun yerine kalayın tercih edildiği EN AW 2007 alaşımı incelenmiştir. A sınıfı işlenebilirlik elde edilse de kurşun içeren alüminyuma nazaran daha düşük mekanik özellikler tespit edilmiştir [36].

Baragetti S., Lusvarghi L., Bolelli G. ve Tordini F., 2008 yılında yaptıkları çalışmada 2011-T6 alaşımına yapılan kaplamaların yorulma davranışını incelemişlerdir. CVD ve PVD yöntemleriyle DLC, SiO_x ve WC/C kaplamalar gerçekleştirilmiştir. DLC ve SiO_x kaplamaların yorulma dayanımını çok etkilemediği görülürken, WC/C kaplamaların daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çizik testi ile ara yüzey delaminasyonu araştırılmış ve WC/C kaplama en iyi adezyonu göstermiştir [54].

Vanian, G., Hellier A., Zarrabi K. Ve Prusty B., 2013 yılında 2011-T6 alaşımının kırılma tokluğunun belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalar kapsamında çentikli çubuk testi yapılmış ve 2011-T6 alaşımının K_{IC} değeri 27.9 MPa√m olarak belirlenmiştir [33].

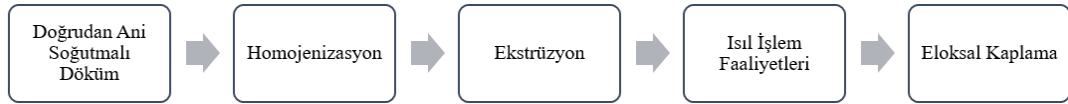
Mohin M., Toofanny H., Babutskyi A., Lewis A., ve Xu Y., 2016 yılında yaptıkları çalışmada 2011 alaşımına yapılan elektromanyetik işlemlerin yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Darbeli elektromanyetik işlem gerçekleştirilmiş numuneler işlenmemiş numuneler ile kıyaslanmış, yorulma ömürleri kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda uygulanan elektromanyetik işlemin darbe yoğunluğunun yorulma üzerine yararlı etkisi olduğu kanıtlanmıştır [55].

Abdul Latif, Giuseppe Ingarao ve Livan Fratini, 2022 yılında yayınlanan makalelerinde, 2011-T3 ve 7075 alaşımının FSC (Friction Stir Consolidation) yöntemiyle ileri dönüşümü üzerine çalışmıştır. Bu alaşımlardan talaş üretimi gerçekleştirerek sertlik dağılımlarını gözlemlenmişlerdir. Alaşımların malzeme akış oranları analiz edilmiş ve numerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, 2011 ve 7075 alaşımlarının talaşlarından billet oluşturulması için FSC yönteminin uygun olduğu gözlemlenmiştir [56].

Ebrahim Seidi ve Scott F. Miller, 2021 yılında yayınlanan makalelerinde, yanal sürtünmeli yüzey kaplama prosesinin 2011, 6061 ve 7075 alaşımlarına uygulanabilirliği üzerine çalışmıştır. Çalışma sonucunda, bu yöntemin ilgili alaşımlara uygulanabilir olduğu gözlemlenmiş, ancak yine de proses parametrelerinin iyileştirilmesi üzerine çalışılması gerektiğini vurgulamışlardır [57].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Mekanik olarak işlenebilir alaşımların üretimi ve geliştirilmesi amacıyla deneysel çalışmalar dizayn edilmiş ve pilot çapta denemeler yapılmıştır. Bu amaçla, prototip döküm tesisinde doğrudan ani soğutmalı döküm yöntemi ile biyet dökümü yapılmıştır. Üretilen biyetler homojenizasyon fırınlarında homojenize edildikten sonra 62 MN gücünde preste ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Profiller üretildikten sonra ısıtma işlemi uygulanmıştır ve korozyon direnci için eloksallanmıştır. Şekil 2.1’de iş akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : İş akış diyagramı.

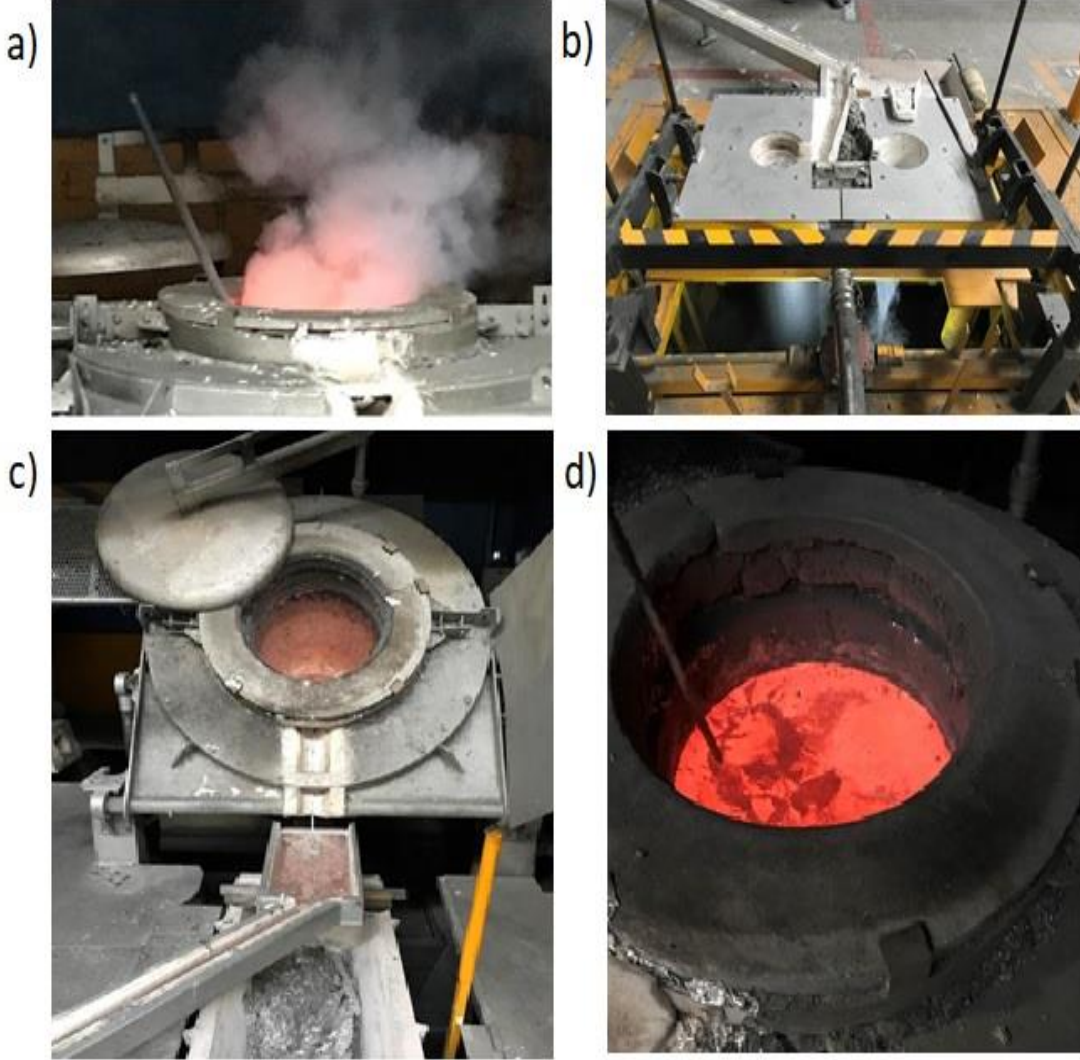
2.1 Doğrudan Ani Soğutmalı Döküm

2011 alüminyum alaşımının dökümü için %99,7 saflıkta alüminyum külçeler 400 kg’lık ergitme potasına şarj edilmiştir. Sıvı alüminyum oluşturulduktan sonra, TS EN 573-3 standardında EN AW 2011 alaşımının sınır şartlarına uygun olacak şekilde alaşım element ilavesi gerçekleştirilmiştir. Optik Emisyon Spektrometresi (OES) kullanılarak ergiyiğin kimyasal bileşimi analiz edilmiştir. Kullanılan döküm parametreleri Çizelge 2.1’de, döküm yapılan potanın ve hattın görselleri ise Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Bu çalışmada döküm sıcaklığı 720°C, su sprej hızı 13 litre/dk olarak seçilmiştir.

Çizelge 2.1 : Döküm parametreleri.

Parametreler	Değerler
Biyet uzunluğu	1100 mm
Biyet çapı	355 mm
Döküm süresi	25 dk
Su sprej hızı	13 litre/dk
Döküm başlangıcında pota metal sıcaklığı	720°C
Gaz alma sıcaklığı	725-735°C

Çizelge 2.1'deki parametrelerin yanında döküm sıcaklığı, döküm hızı, su sprey hızı gibi parametreler de doğrudan ani soğutmalı döküm prosesinde önemli parametrelerdendir.



Şekil 2.2 : a) Döküm rafinasyon aşaması, b) Döküm sırasında döküm tablası ve biyetler, c) Döküm sırasında pota görünümü, d) Rafinasyon aşaması sonrası temizlenmiş sıvı alüminyum.

2.2 Homojenizasyon

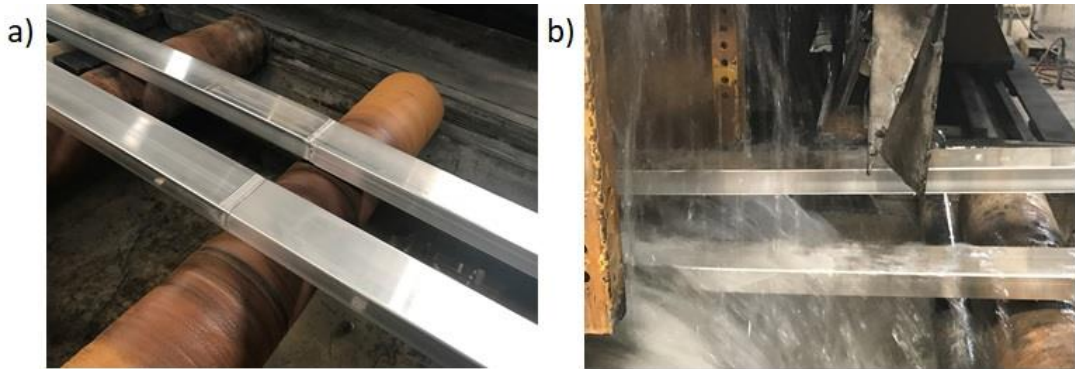
Doğrudan ani soğutmalı döküm (DC Casting) sonrası üretilen biyetler homojenizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Fırın içerisindeki biyetler Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Endüstriyel tesiste bulunan batch tipi homojenizasyon fırınlarında 475°C'de homojenizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3 : Homojenizasyon fırınındaki 2011 alaşım biyetleri.

2.3 Ekstrüzyon

Biyetler önce gaz yakıtlı fırında 400°C 'ye , sonrasında indüksiyon fırınında 430°C 'ye ısıtılmıştır. Ekstrüzyon için 62 MN gücünde geleneksel ileri ekstrüzyon presi kullanılmıştır. İşlem sırasında 62 MN pres içerisinde yüksek sıkışma ve sürtünmeden dolayı sıcaklık artmaktadır. Dolayısıyla biyetlerin baş tarafında sıcaklık sonuna göre daha yüksektir. Bunu önlemek adına indüksiyon fırınında biyetler bölgesel olarak ısıtılmaktadır. Fırın içerisinde biyetin başına denk gelen kısım daha yüksek sıcaklığa (430°C) getirilirken son kısmında (410°C) sıcaklık daha düşüktür. Bu durum konik ısıtma olarak adlandırılmaktadır. Biyet sıcaklıkları istenilen ekstrüzyon çıkış sıcaklığına göre belirlenmektedir. İndüksiyon fırını belirlenen sıcaklığa ulaştıktan sonra sıcaklığın homojen şekilde biyet içerisinde dağılabilmesi için 230-270 saniye aralığında bekletilmektedir. İndüksiyon ısıtma işlemi sonrası biyet sıcaklıkları kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır. Ekstrüzyon sonrası üretilen profiller ve su verme işlemi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : a) Ekstrüzyon presinden çıkan profiller, b) Su verme işlemi.

Ekstrüzyon üretimleri için ara iş mesafesi (ekstrüzyon artığı) 80 mm olarak ayarlanmıştır. Yani presten çıkan biyetlerin son 80 mm'lik kısmı kesilerek hurdaya ayrılmıştır. Böylelikle biyetler arası geçişlerde mukavemet düşüşüne sebep olabilecek kısımlar üretime dahil edilmeyerek risk alınmamıştır. Üretim süresince sıcaklık ölçümleri kızılötesi sıcaklık ölçüm cihazı yardımıyla yapılmıştır. 4 biyetin üretimi sırasında kullanılan ekstrüzyon parametreleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Ekstrüzyon parametreleri.

Biyet no:	Ekstrüzyon Hızı	Ekstrüzyon Çıkış Sıcaklığı	Quench Sonrası Sıcaklık
1	0,8 mm/s	T _{ötektik} – 20°C	Oda Sıcaklığı
2	1,7 mm/s	T _{ötektik} – 25°C	Oda Sıcaklığı
3	1,7 mm/s	T _{ötektik} – 15°C	Oda Sıcaklığı
4	1,7 mm/s	T _{ötektik} – 30°C	Oda Sıcaklığı

2.4 Isıl İşlem Faaliyetleri

Çözeltiye alma ve bunu takiben su verme işleminden sonra direkt olarak sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alınan ve su verilen alaşımlara sonrasında yaşlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alınan, su verilen ve ısıtıl işlem uygulanan numuneler Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : a) Çözeltiye alınan numuneler, b) Su verme işlemi, c) Isıl işlem uygulanan numuneler.

2.5 Eloksal Kaplama

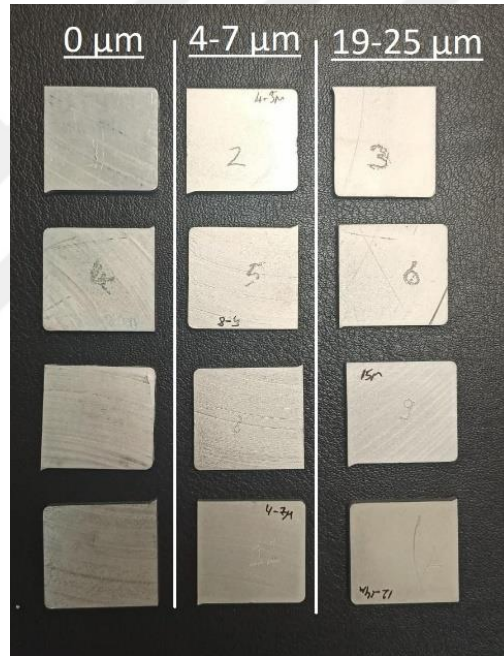
Üretilen profillerin korozyon davranışının incelenmesi amacıyla 30 x 20 x 2,5 mm boyutlarında numuneler kesilerek hazırlanmış ve farklı kalınlıklarda eloksall kaplanmıştır. Proses sırasında kullanılan anodizasyon parametreleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Numuneler eloksall aksesuar tesisine asılıp eloksall banyosuna daldırılarak farklı sürelerde kaplanmıştır. İki farklı kalınlık grubunda

(4-7 μm ve 19-25 μm aralığında) üretilen eloksal kaplanmış numuneler korozyon davranışlarının belirlenmesi amacıyla incelenmiştir.

Çizelge 2.3 : Numunelere uygulanan anodizasyon parametreleri.

Grup	Sıcaklık, °C	Banyo süresi, dk	Voltaj, V	Akım yoğunluğu, A/dm ²	Eloksal kalınlığı, μm
1	18-24	10	17	1.5	4-7
2	18-24	50	17	1.5	19-25

Banyo süresi eloksal kalınlığına göre değişmektedir. Diğer parametreler ise çok değiştirilmeden istenilen kalınlık sağlanabilmektedir. Eloksal kaplanan numuneler Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Farklı sürelerde ve kalınlıklarda eloksal kaplanmış numunelerin görüntüsü.



3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

Mekanik olarak işlenebilir alüminyum alaşımlarının eldesi ve geliştirilmesi amacıyla üretilen 2011 alaşımının malzeme özellikleri OES, DSC, SEM/EDS kullanılarak analiz edilmiş, mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, çekme, işlenebilirlik ve eloksal kaplama sonrası korozyon testleri gerçekleştirilerek sonuçlar irdelenmiştir.

3.1 Kimyasal Analiz Sonuçları

Optik emisyon spektrometresi ile döküm sırasında alınan numunelerin kimyasal içeriği analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında elde edilen değerler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Toplamda 4 ayrı döküm gerçekleştirilerek 355 mm çapında 4 adet biyet üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen biyetlerden homojenizasyon işlemi öncesini karakterize edebilmek için kesilerek numune alınmıştır.

Çizelge 3.1 : OES analiz sonuçları.

Döküm	Cu	Bi	Pb	Al
1	5,69	0,38	0,32	Kalan
2	5,45	0,47	0,5	Kalan
3	5,37	0,54	0,58	Kalan
4	5,01	0,43	0,22	Kalan

Kimyasal analiz sonuçları, üretilen alaşımların TS EN 573-3 standartlarına göre 2011 alaşım sınırları içerisinde kaldığını göstermiştir.

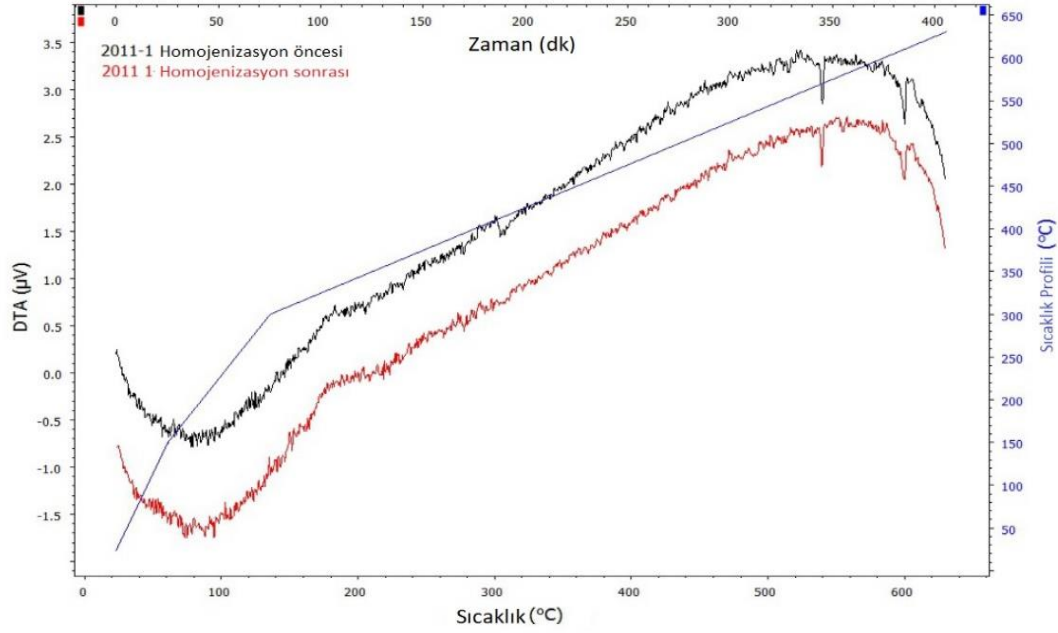
3.2 DSC Analizleri

Üretilen biyetlere homojenizasyon öncesinde ve sonrasında Linseis marka DSC cihazında DSC analizleri yapılmış, Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te verilen sonuçlar elde edilmiştir.

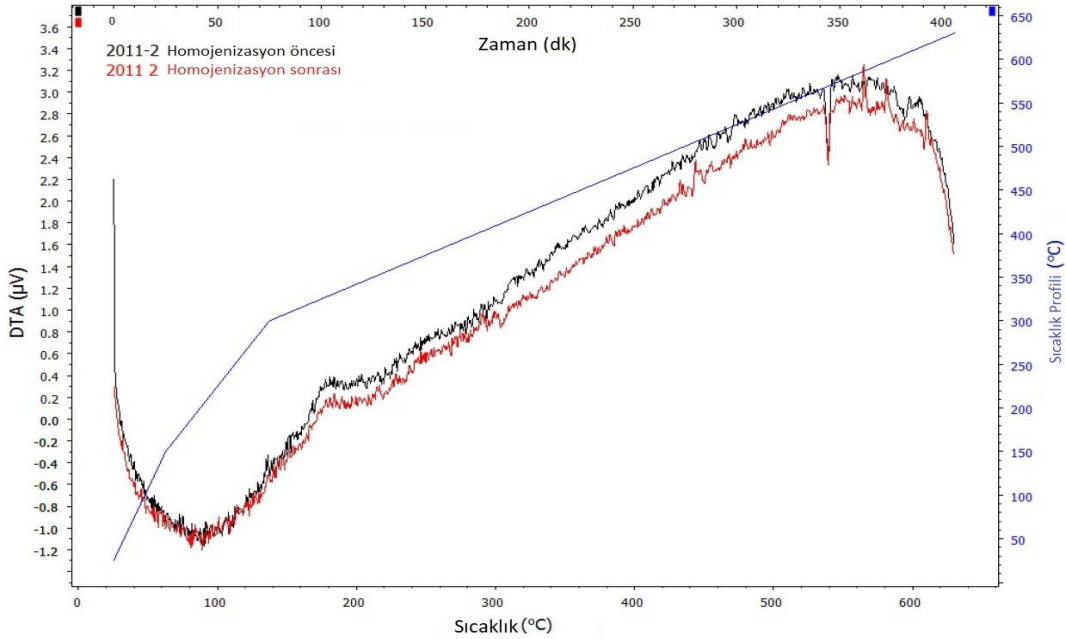
1. biyete yapılan homojenizasyon öncesi DSC analizleri sonucuna göre, 540.9°C’de ve 601.3°C’de pikler gözlemlenmiştir. Aynı biyetin homojenizasyon sonrası analizinde ise 540.7°C’de ve 600.9°C’de piklerle karşılaşmıştır.

2. biyete yapılan homojenizasyon öncesi DSC analizleri sonucuna göre, 541.1°C'de ve 595°C'de pikler gözlemlenmiştir. Homojenizasyon sonrası yapılan analizde ise bu pikler 540.5°C'de ve 611°C'de gözlemlenmiştir.

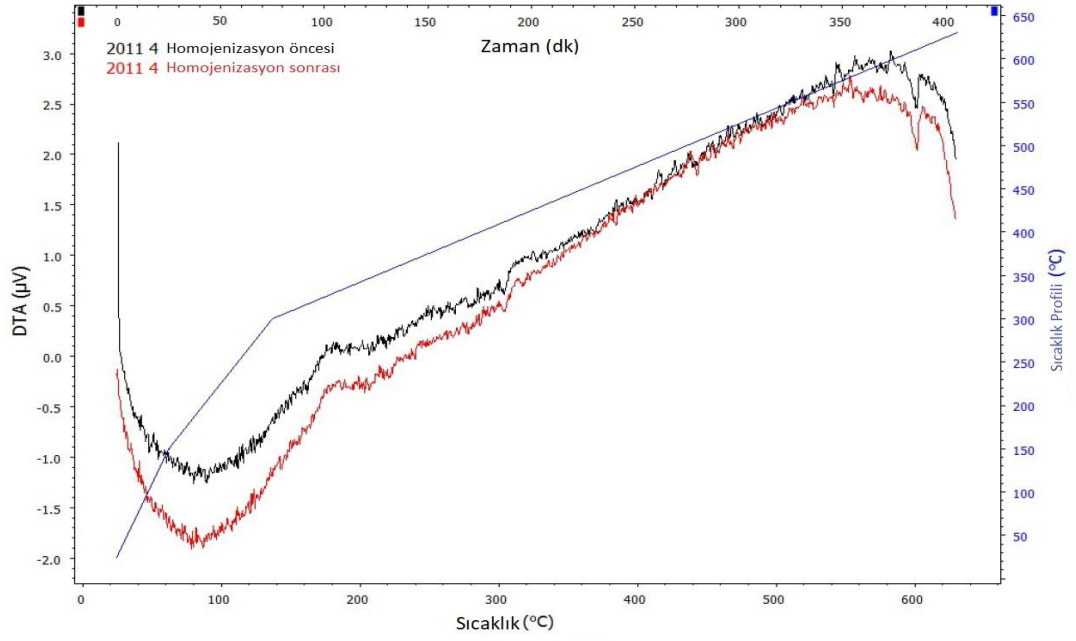
4. Biyete yapılan homojenizasyon öncesi DSC analizinde 545.5°C'de ve 602.2°C'de pikler gözlemlenmiştir. Homojenizasyon sonrasında ise 602.4°C'de pik oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.1 : 1. Biyetin homojenizasyon öncesi ve sonrası DSC analizleri.



Şekil 3.2 : 2. Biyetin homojenizasyon öncesi ve sonrası DSC analizleri.

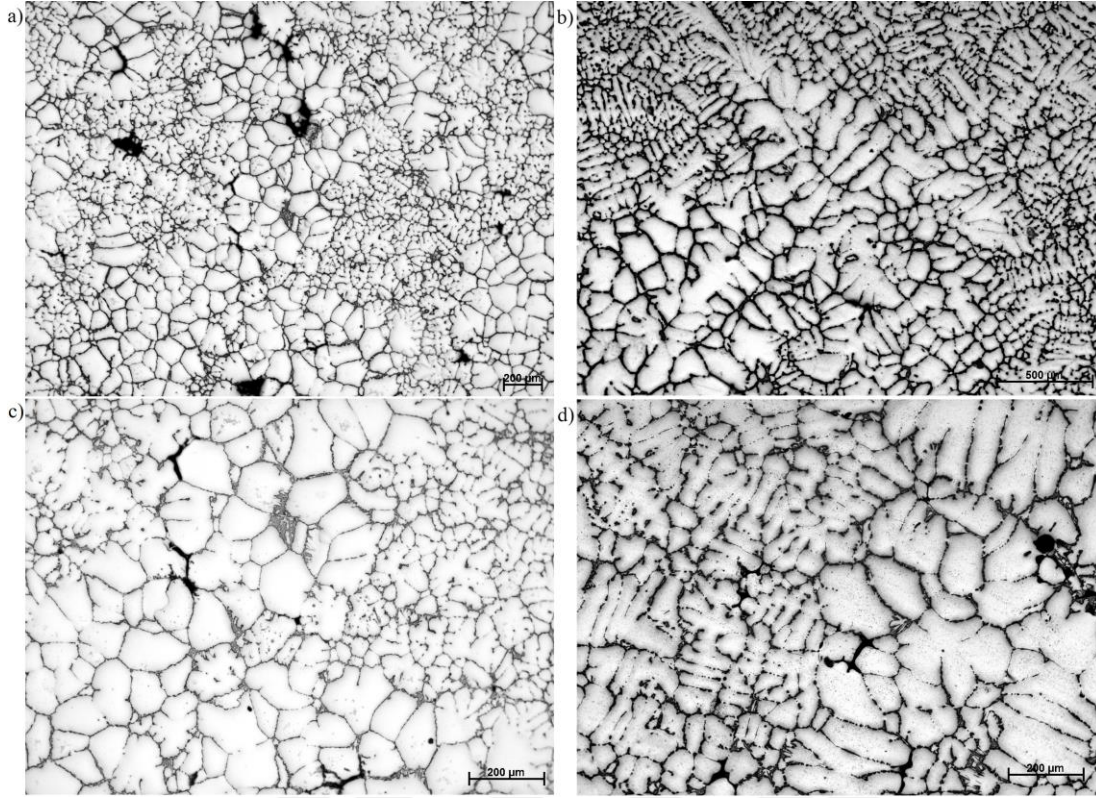


Şekil 3.3 : 4. Biyetin homojenizasyon öncesi ve sonrası DSC analizleri.

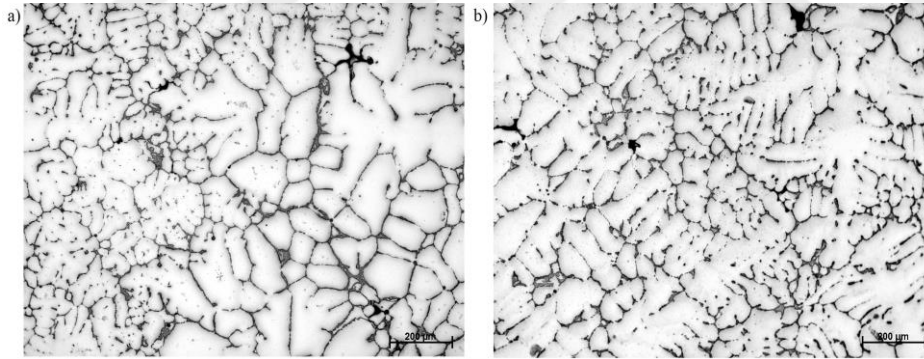
Yapılan DSC analizleri sonuçlarına göre, homojenizasyon öncesi ve sonrası faz dönüşüm sıcaklıklarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Homojenizasyon 480-520°C sıcaklık aralığında yapıldığında daha uygun iç yapı eldesi sağlanacaktır.

3.3 Mikro Yapı Karakterizasyon Sonuçları

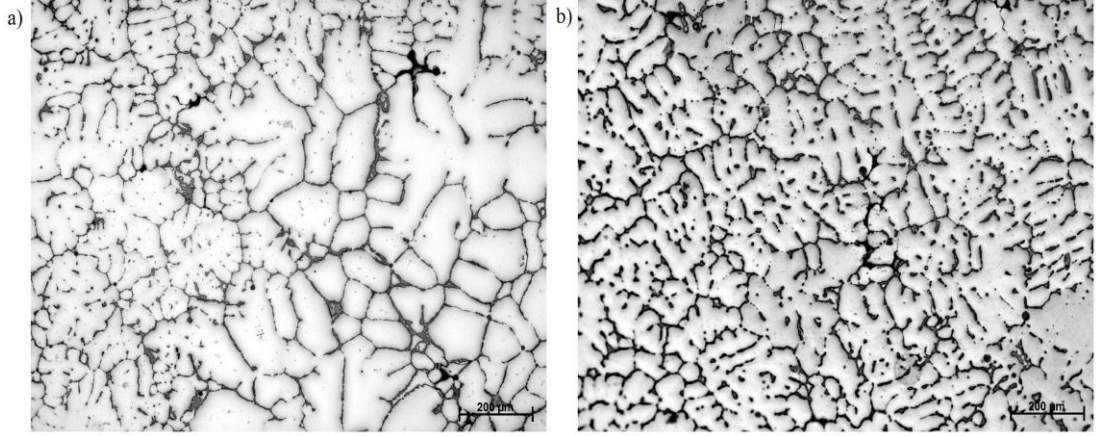
Mikro yapının incelenebilmesi için öncelikle numuneler uygun şekilde bakalite alınmıştır. Bakalite alma işlemi 25 gr Metkon Epocold-R ve 5 gr Metkon Epocold-H kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bakalitin kuruması için beklemeye alınmıştır. Kurutma işleminden sonra zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla 180, 320, 500, 1200 ve 2400 numaralı zımpara kağıtlarıyla zımparalama, ardından parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra HF ile dağlama yapılmış ve numunelerin optik mikroskop altındaki görüntüleri incelenmiştir. Her biyet için homojenizasyon öncesi ve sonrası mikro yapılar 5x ve 10x büyütmede Zeiss Axio Scope A1 mikroskopta incelenmiştir. Bu görüntüler Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



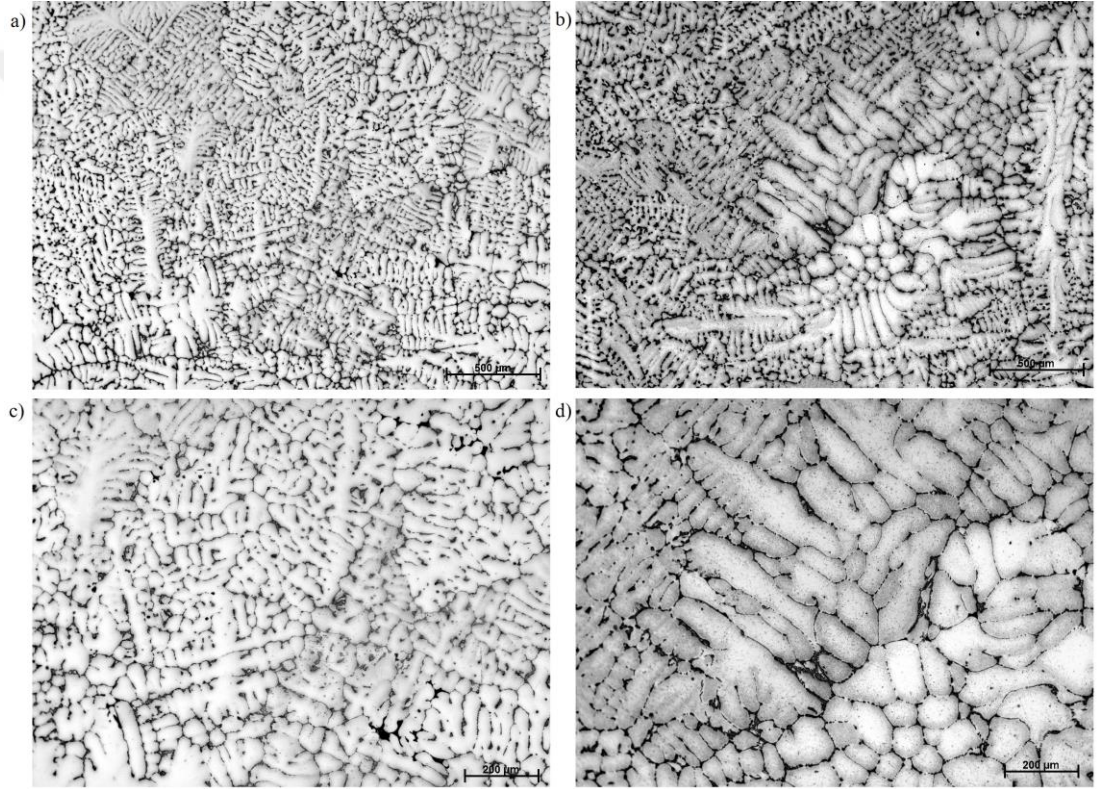
Şekil 3.4 : 1. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (5x), b) Homojenizasyon sonrası (5x), c) Homojenizasyon öncesi (10x), d) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri.



Şekil 3.5 : 2. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (10x), b) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri.



Şekil 3.6 : 3. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (10x), b) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri.



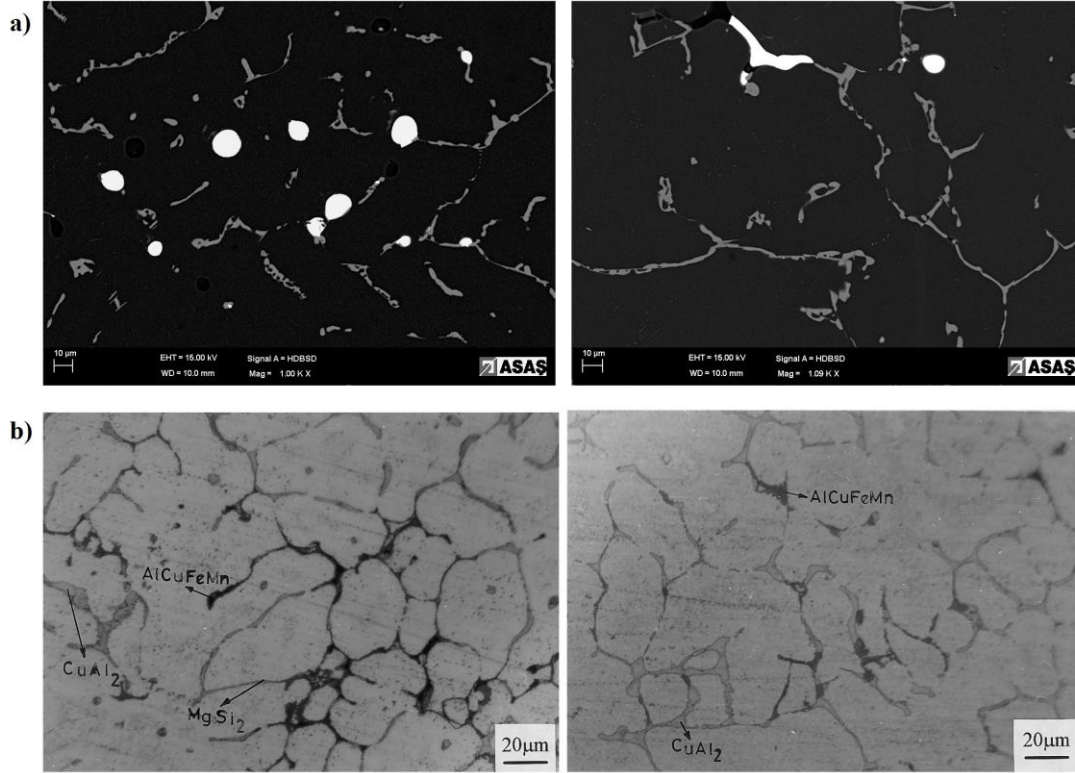
Şekil 3.7 : 4. Biyetin a) Homojenizasyon öncesi (5x), b) Homojenizasyon sonrası (5x), c) Homojenizasyon öncesi (10x), d) Homojenizasyon sonrası (10x) mikro yapı görüntüleri.

Mikro yapı incelemeleri sonucunda alüminyum matris içerisinde dentritik yapılarla karşılaşmıştır. Homojenizasyon öncesi ve sonrası yapılar birbirine benzemektedir. Homojenizasyon işlemi dentritik yapıların morfolojisini etkilememiştir. Ayrıca, homojenizasyon sıcaklığı 2011 alaşımı için yeterince yüksek olmadığından çökelti fazları ve intermetalik fazlar matris içerisinde çözünememiştir.

3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) Analiz Sonuçları

Bakalite alınmış 2. biyete ait (%5,45 Cu içeren) numuneler, “Quorum SC7620 Sputter Coater” cihazında yaklaşık 10 nm boyutlarında Au/Pd ile kaplanmıştır. Numunelerin SEM görüntülemesi ZEISS EVO MA 15 elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin 15 kV altında 1 kx büyütme altındaki SEM görüntüleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir. M. Gavgali ve B. Aksakal, 2014 alaşımı üzerine yaptıkları çalışmada homojenizasyon sıcaklığının mikro yapıya etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar yine Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

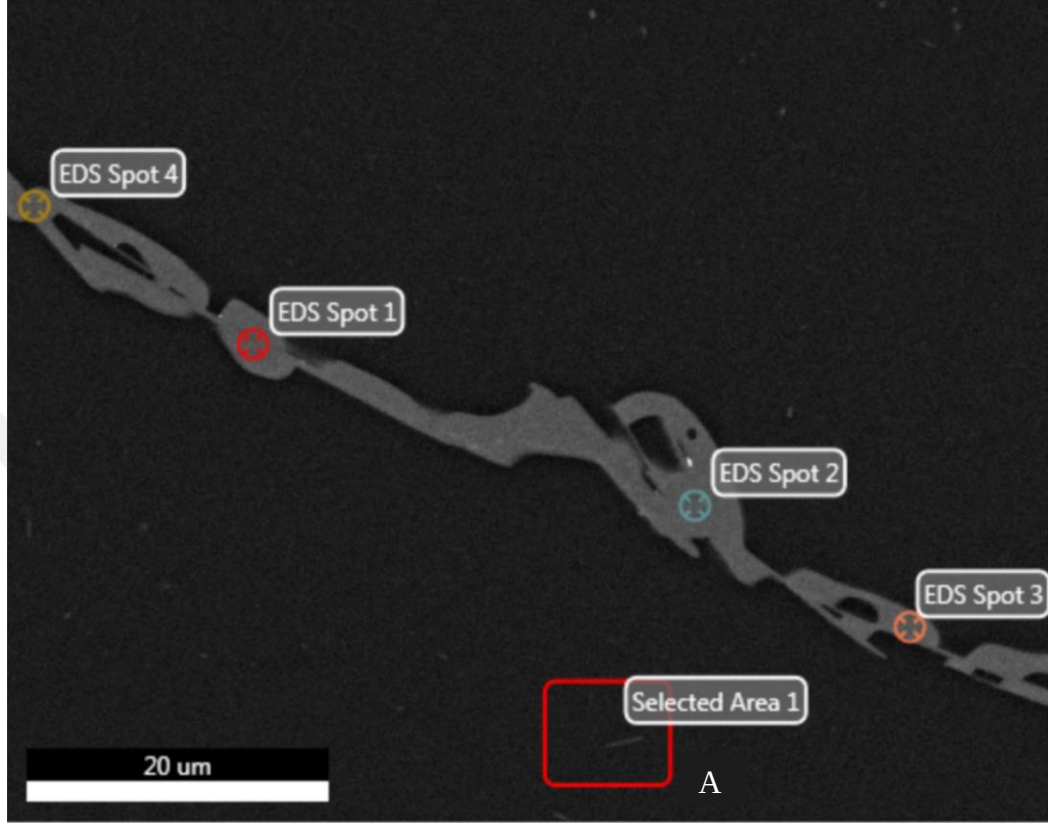
Mikro yapıda belirlenen noktalara EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizi yapılmıştır.



Şekil 3.8 : a) 2011 alaşımı (2. Biyet) SEM görüntüleri, b) 2014 alaşımının optik mikroskop altındaki görüntüleri [58].

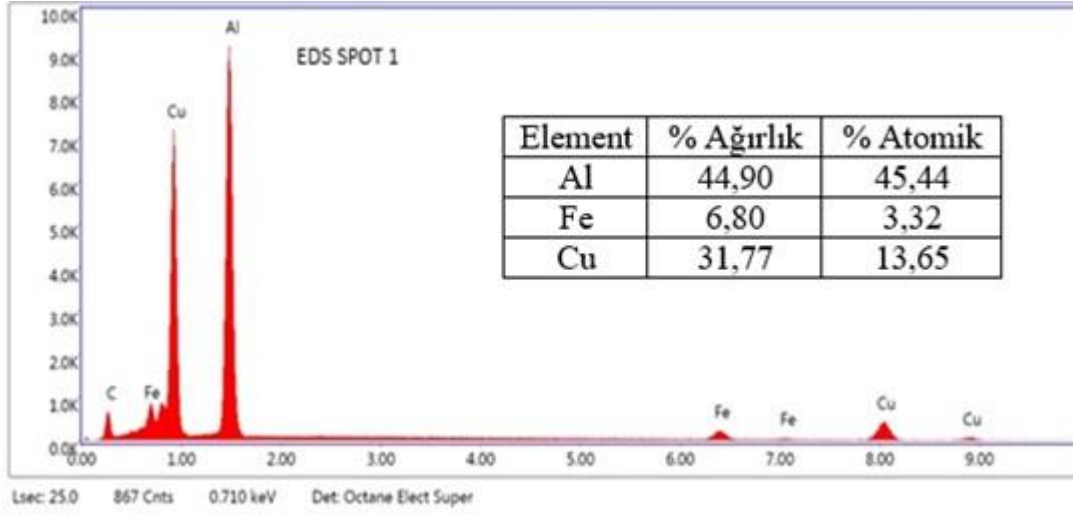
İncelenen numuneler için elementlerin K_{α} karakteristik X-Ray enerjileri kullanılmıştır. Seçilen bölgeler Şekil 3.9’da gösterilmiştir. EDS analizi yapan yazılımın en iyi şekilde çalışabilmesi için, bölgeler seçildikten sonra bu bölgelerde mevcut olabilecek elementlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sayede, olmaması gereken ancak yazılım hatası olarak grafikte bulunacak hatalı piklerin önüne geçilebilmektedir. Bölgelerde bulunabilme ihtimali olan elementler program üzerinden seçilmiştir. OES ile

belirlenen kimyasal kompozisyonlardan bu aşamada yardım alınmakla beraber, bulunabilecek diğer muhtemel elementler de program üzerinden seçilerek analiz gerçekleştirilmiştir.

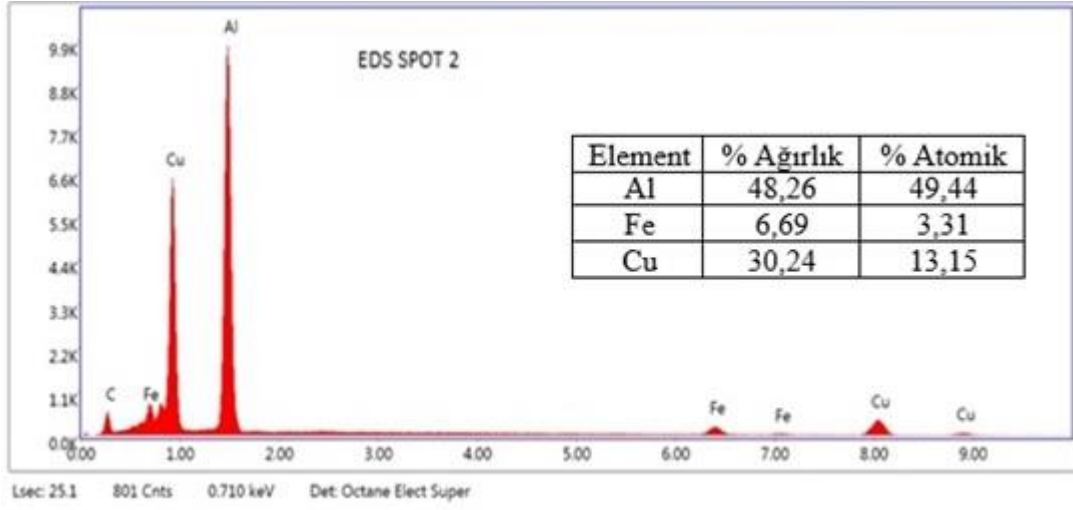


Şekil 3.9 : EDS analizi yapılan noktalar (2. Biyet).

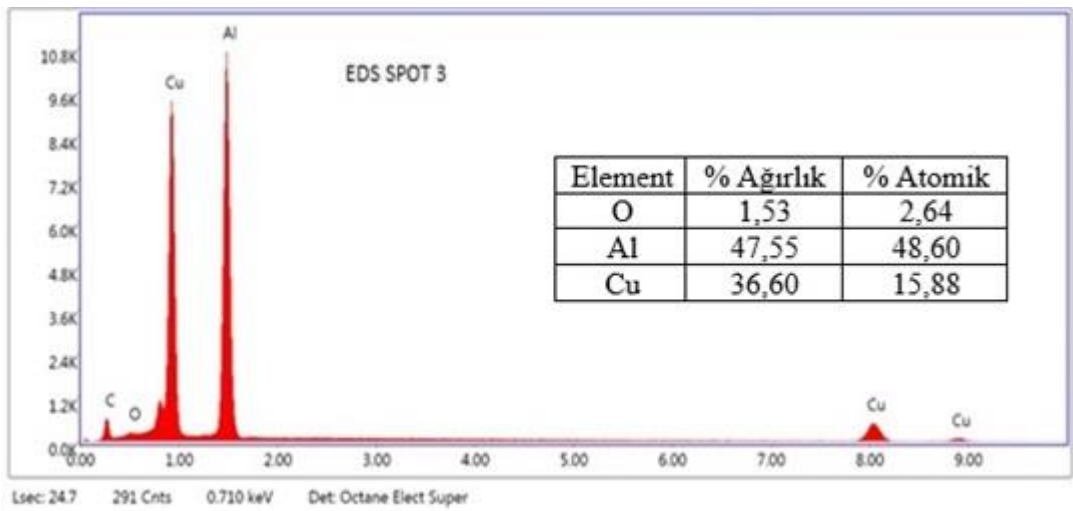
2. biyetin belirlenen noktalarından elde edilen grafikler Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 13 ve Şekil 3.14’te gösterilmiştir. Grafiklerin yatay eksenini enerjiyi (keV), dikey eksenini ise şiddeti (atım sayısı) göstermektedir. Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 gri renkli bölgelerden alındığından buradaki pikler birbirine benzemektedir. Al ve Cu’nun yoğunlukta olduğu bu grafiklerden anlaşılabilmektedir. A bölgesine yapılan (siyah renkli) EDS analizi ise Şekil 3.14’te gösterilmiştir. Grafikten hareketle bu bölgenin beklendiği gibi alüminyum matris olduğu söylenebilmektedir. Cu pikinin görülmesi ise, 2011 alaşımının ana alaşım elementi olan bakır kaynaklıdır. Alüminyum ile bakır arasında oluşan Al_2Cu fazları mikro yapıda çökelmektedir ve SEM cihazında yapılan EDS’te de özellikle bu fazların olduğu bölgeler analiz edilmiştir.



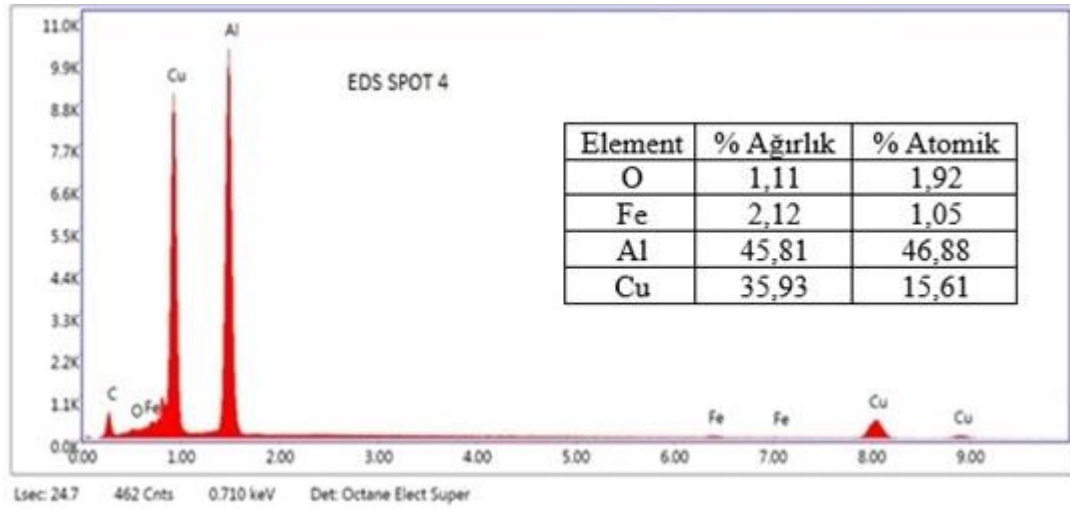
Şekil 3.10 : Şekil 3.9'daki 1 no'lu bölgenin EDS analizi.



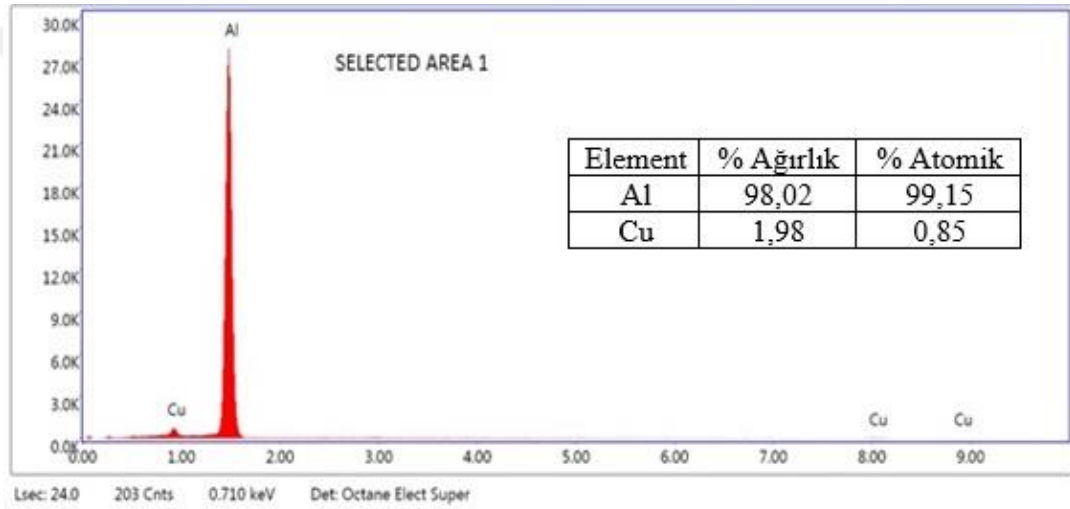
Şekil 3.11 : Şekil 3.9'daki 2 no'lu bölgenin EDS analizi.



Şekil 3.12 : Şekil 3.9'daki 3 no'lu bölgenin EDS analizi.



Şekil 3.13 : Şekil 3.9'daki 4 no'lu bölgenin EDS analizi.



Şekil 3.14 : Şekil 3.9'daki A bölgesinin EDS analizi.

SEM incelemesinde küresel ve iğnesel yapılar rastlanmıştır. Yapıların kimyasal bileşiminin anlaşılması amacıyla gerçekleştirilen EDS analizlerinde 2011 alaşımının ana alaşım elementi olan Cu pikleri, bunun yanı sıra alaşım içerisinde bulunan ve Al_7Cu_2Fe intermetalliğini oluşturan Fe pikleri de gözlemlenmiştir.

3.5 Sertlik Ölçümleri

Üretilen profillerden alınan numunelere çözeltiye alma işleminden sonra direkt olarak Brinell sertlik ölçümü yapılmıştır ve elde edilen değerler Çizelge 3.2'de verilmiştir. Yapılan ölçümlere göre 1. biyetten üretilen profillerde en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.

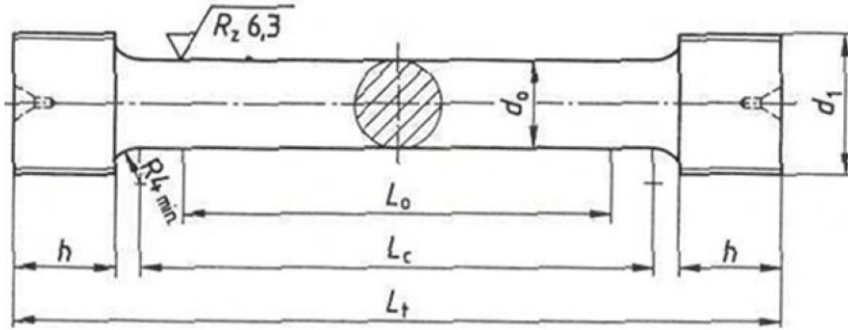
Çizelge 3.2 : Sertlik değerleri.

Biyet no.	Sertlik Değeri (HB)
1	84
2	79
3	81
4	79

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda, sertliklerin TS EN 755-2 standardına göre 2011-T4 kondisyonu için yeterli olmadığı görülmüştür. Bunun muhtemel sebebi ekstrüzyon çıkış sıcaklığının çözeltiye alma sıcaklığına yakın olmamasından kaynaklanmaktadır. T4 ve T6 kondisyonunun sağlanabilmesi için profiller ayrı olarak çözeltiye alınmalıdır.

3.6 Çekme Testi Sonuçları

Çözeltiye alma işleminden sonra numunelere yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu termik işlemler sonrasında profillerden 3'er adet çekme testi numunesi CNC tornada işlenerek çıkarılmıştır. Çekme testleri için numuneler DIN 50 125 standardına göre hazırlanmıştır. Şekil 3.15'te bu standarda göre hazırlanması gereken numunenin boyutları, Çizelge 3.3'te bu boyutların değerleri ve Şekil 3.16'da hazırlanan numuneler gösterilmektedir.



Şekil 3.15 : DIN 50 125 standardına göre çekme testi numune görüntüsü ve boyutları.

Çizelge 3.3 : DIN 50 125 standardında çekme numunesi boyutları.

d ₀	l ₀	d ₁	r (min.)	h (min.)	L _c (min.)	L _t (min.)
4	20	M6	3	6	24	41
5	25	M8	4	7	30	51
6	30	M10	5	8	36	60
8	40	M12	6	10	48	77
10	50	M16	8	12	60	97
12	60	M18	9	15	72	116
14	70	M20	11	17	84	134
16	80	M24	12	20	96	154



Şekil 3.16 : DIN 50 125 standardına göre hazırlanan çekme numuneleri.

Şekil 3.17’de gösterilen Zwick Zoel Z250 marka-modeldeki çekme cihazında, numunelere ISO 6892 standardına uygun olarak çekme testi yapılmıştır. Çekme testi $0,008 \text{ s}^{-1}$ gerilme hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17 : Zwick Zoel Z250 çekme test cihazı.

Hazırlanan numunelere uygulanan çekme testi sonrasında elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.4 : 165°C 12 saat ısıtıl işlem uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları.

Numune no:	Biyet no:	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	A (%)
A11	1	265,75	406,57	14,76
A12	1	266,38	387,37	18,57
A13	1	263,68	408,11	17,48
A21	2	272,44	411,47	12,43
A22	2	261,71	381,50	15,66
A23	2	236,89	360,52	18,14
A31	3	274,71	413,46	14,76
A32	3	281,40	423,68	13,19
A33	3	248,76	381,78	18,79
A41	4	275,35	418,28	10,92
A42	4	245,05	384,55	18,79
A43	4	252,15	388,98	17,89

Çizelge 3.5 : 170°C 11 saat ısıtıl işlem uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları.

Numune no:	Biyet no:	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	A (%)
B11	1	264,46	406,97	16,23
B12	1	253,75	377,76	14,25
B13	1	266,12	401,82	14,74
B21	2	279,27	410,86	12,69
B22	2	274,05	412,87	12,64
B23	2	247,17	376,05	17,73
B31	3	266,85	413,37	10,35
B32	3	281,58	420,06	11,10
B33	3	252,77	381,20	12,31
B41	4	239,51	354,35	17,27
B42	4	256,37	387,73	16,23

Çizelge 3.6 : 180°C 7 saat ısıtıl işlem uygulanan numunelerin çekme testi sonuçları.

Numune no:	Biyet no:	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	A (%)
C11	1	263,65	393,78	11,43
C12	1	244,49	367,76	17,97
C13	1	258,14	388,08	13,02
C21	2	270,04	402,33	13,12
C22	2	256,25	375,82	18,48
C23	2	261,74	396,09	16,42
C31	3	274,48	406,00	11,49
C32	3	241,52	368,35	19,89
C33	3	276,87	406,39	10,71
C41	4	255,58	381,54	16,21
C42	4	239,52	357,68	20,10
C43	4	253,33	381,30	16,03

T6 ısıtım işlemi kondisyonu için TS EN 755-2 standardında belirtilen akma mukavemet değeri minimum 230 MPa, çekme mukavemeti değeri ise minimum 310 MPa olmalıdır. Yapılan çekme testleri sonuçlarına göre profillerin akma ve çekme mukavemetleri uygun aralıktadır.

3.7 İşlenebilirlik Testleri

2011 alaşımına Ø16 boyutunda uç ile 800 devir/dk hızında delik delme işlemi gerçekleştirilerek alaşımın işlenebilirliği incelenmiştir. Şekil 3.18'de talaş karakteristikleri ve 2011 alaşımından elde edilen talaşlar gösterilmektedir. Yüksek hızlarda yapılan bu işlemlerde spiral talaş gözlemlenmiştir ve talaş karakteri kabul edilebilir formdadır. ISO 3685 standardına göre bu talaş tipi işlenen malzemeler için uygundur [59].

Talaş Çeşidi	Şekli	Karakteristiği ve Oluşumu
Spiral		Bu tip talaşlar genelde sfero döküm malzemede düşük ilerleme hızında oluşur. Kesme ağzında başlayan talaş, boşaltma kanalı etkisi ile kıvrılır. Birkaç kıvrım sonrası talaş kırılıyorsa kabul edilebilir bir formdur.
Yolma Talaş		Uzun talaşlar sarmaya imkan vermeden tahliye edilir. Bu talaş kolay bir şekilde matkaba dolanabilir.
Yarım Kabuk		Boşaltma kanalı ve delik yan duvarları etkisi ile kırılmak suretiyle oluşan bir talaş formudur. Yüksek ilerleme hızlarında oluşur.
Bayrak		Konik sarmal bir şekil alan ve fazla uzamadan delik yan duvarı etkisi ile kırılan bir talaş formudur. Delik yan duvarı talaşa gerekli uzama imkanı sağlamamaktadır. Mükemmel bir talaş şekillendirmesi ve tahliyesi sağlar.
Zik-Zak		Talaş boşaltma kanalı formu ve malzemeye bağlı olarak oluşan bir talaş formudur. Talaş boşaltma kanalında kolayca talaşın sıkışmasına sebep olur.
İğne		Titreşim yada gevrek malzemede küçük radyüs sebebiyle talaş kırılır. Artan performans ile birlikte memnuniyet verici bir talaş formudur. Ancak birbirinin üzerine bindirmek suretiyle talaş yığılmasına sebebiyet verir.



Şekil 3.18 : a) Talaş tipleri [60] b) Delik delme sonrası oluşan talaşlar.

3.8 Korozyon Testi

Eloksal kaplanan ve kaplanmayan numunelerin korozyon davranışının belirlenebilmesi için tüm numuneler 1 su litresinde 30 gr NaCl, 10±1 mL HCl içeren korozyon ortamına alınmıştır. Hazırlanan çözelti Şekil 3.19’da gösterilmektedir.



Şekil 3.19 : Su, NaCl ve HCl’den oluşan korozyon çözeltisi.

Şekil 3.20’de $t=0$ anında korozyon ortamındaki numuneler gösterilmektedir. Aynı kesitteki numuneler aynı miktarda korozyon ortamına alınmıştır.



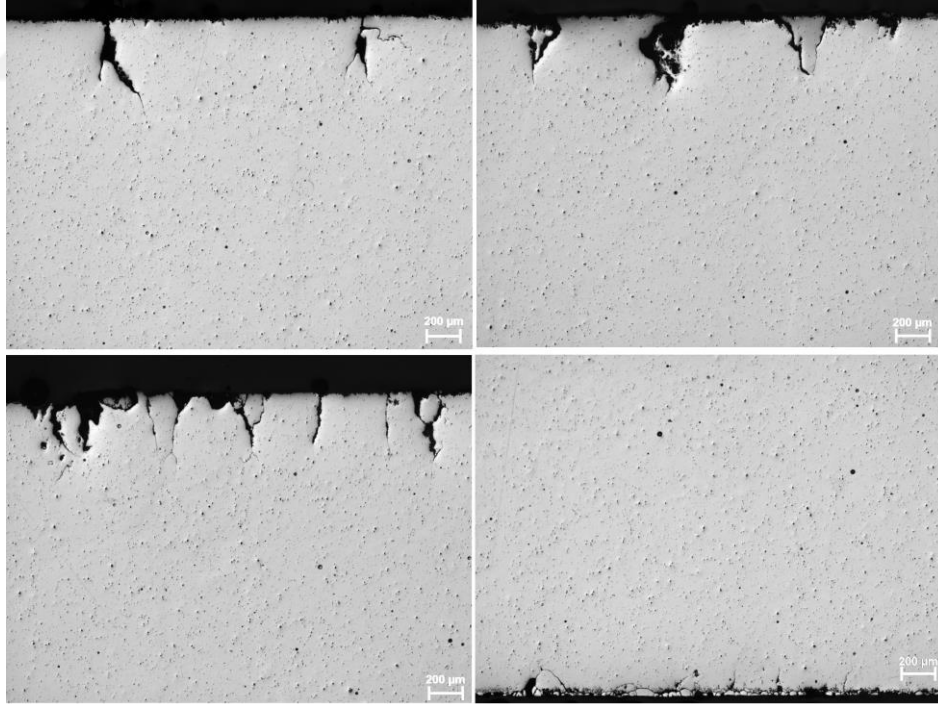
Şekil 3.20 : $t=0$ anında korozyon ortamındaki numuneler.

24 saat bekleminin ardından numuneler çıkarılmış, bakalite alınarak optik mikroskop ve SEM/EDS incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Korozyon sonrası numuneler Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

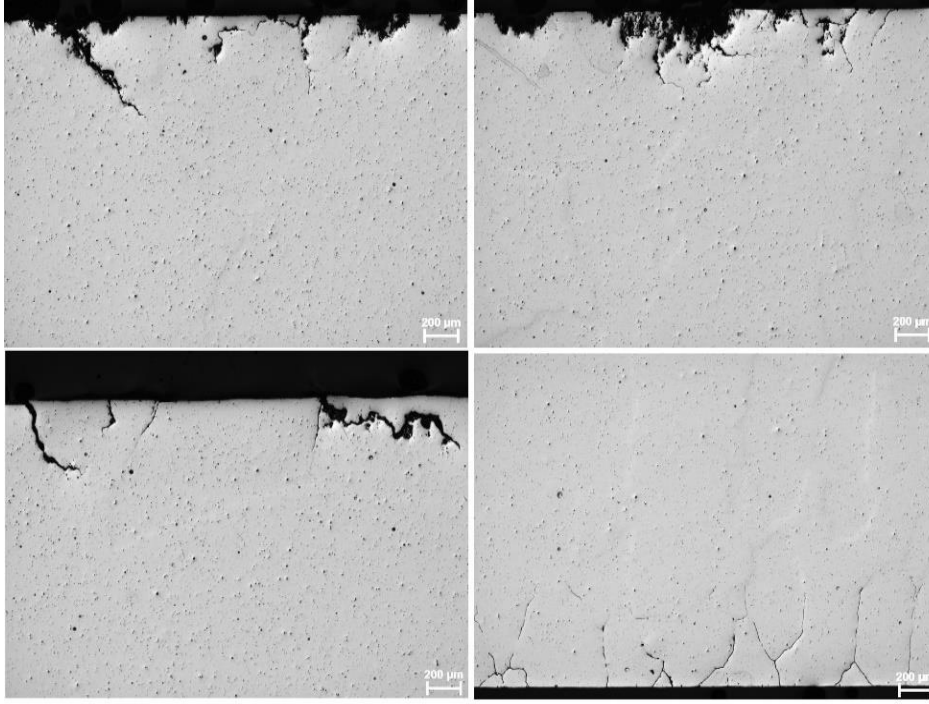


Şekil 3.21 : 24 saat korozif ortamda bekletilmiş numuneler.

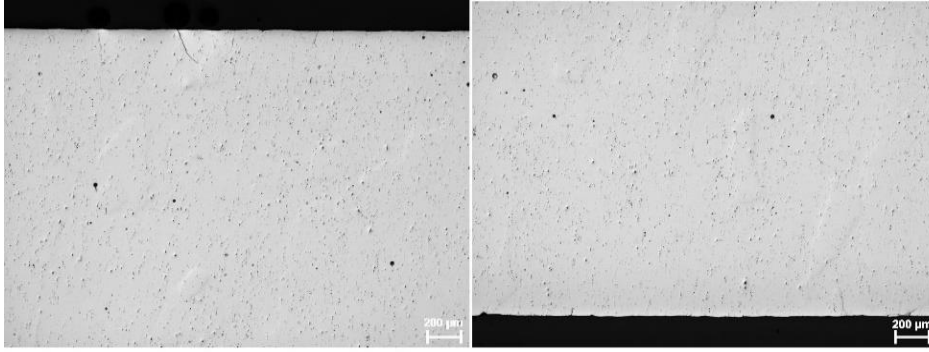
Korozyon testi gerçekleştirilen numuneler bakalite alınmış ve ardından metalografik hazırlıklar yapılmıştır. Bu hazırlıklar sırasıyla hazırlanan numunelerin kesilmesi, zımparalanması ve parlatılmasıdır. Optik mikroskop altında 5x büyütmede alınan görüntüler Şekil 3.22, Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.22 : Eloksal kaplı olmayan numunenin görüntüsü (5x).



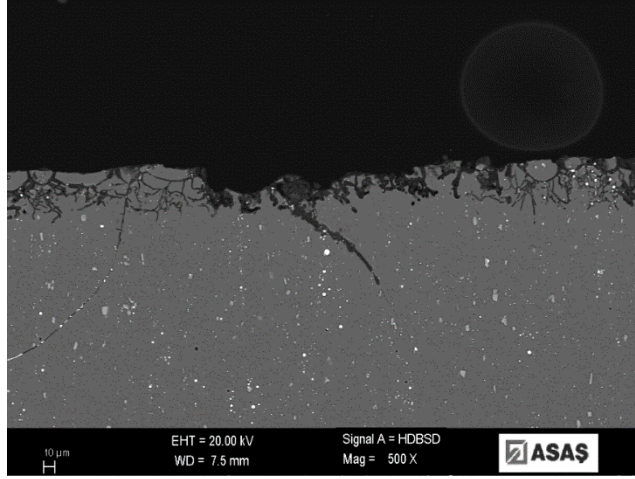
Şekil 3.23 : 4-7 µm eloksal kaplı numunenin görüntüsü (5x).



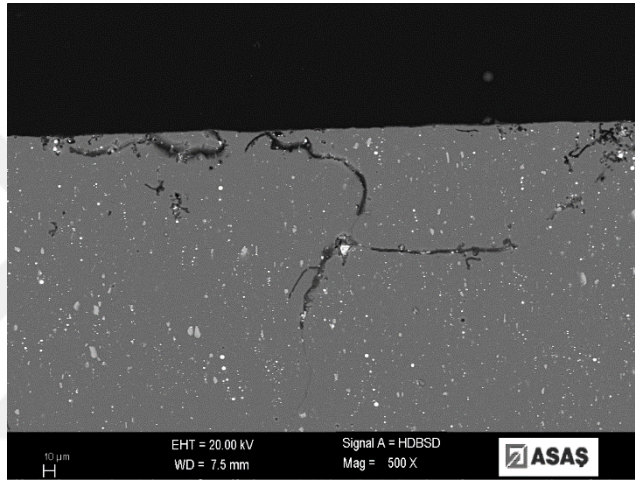
Şekil 3.24 : 19-25 µm eloksal kaplı numunenin görüntüsü (5x).

Eloksal kaplı olmayan numunede en derin korozyon 562 µm, 4-7 µm aralığında eloksal kaplı numunede 505 µm, 19-25 µm aralığında eloksal kaplı numunede ise 201 µm olarak ölçülmüştür. 19 µm ve üzeri eloksal kaplamada daha uzun süreli korozyon direnci olduğu görülmüştür.

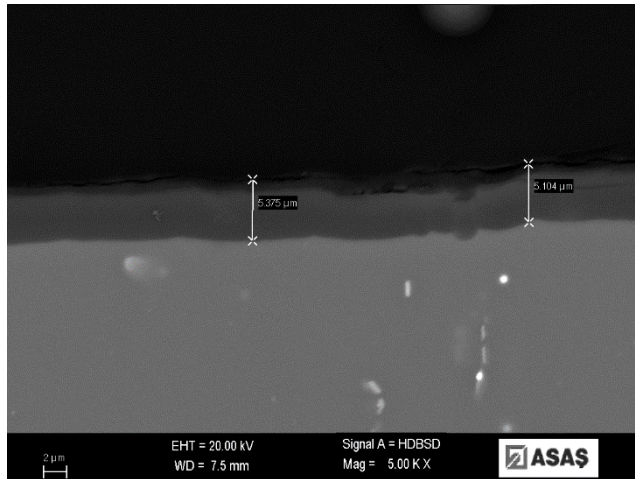
Eloksal kaplı olmayan ve korozyona uğramış numunenin SEM görüntüsü Şekil 3.25'te, 4-7 µm eloksal kaplı numunenin SEM görüntüsü Şekil 3.26'da ve 19-25 µm eloksal kaplı numunenin SEM görüntüsü Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.25 : Eloksal kaplı olmayan numunenin SEM görüntüsü.

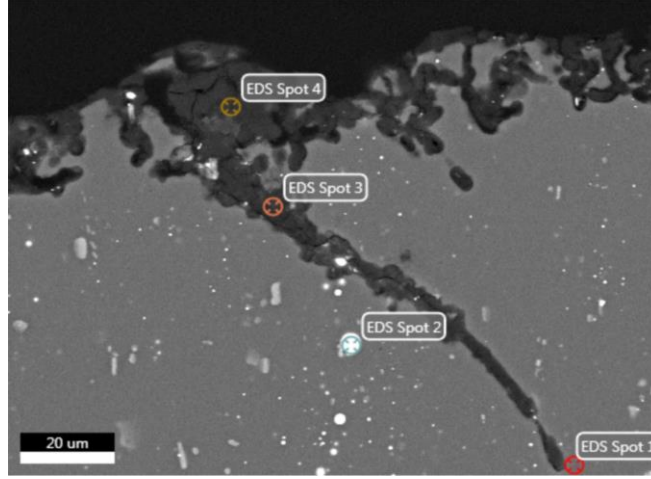


Şekil 3.26 : 4-7 µm eloksal kaplı numunenin SEM görüntüsü.

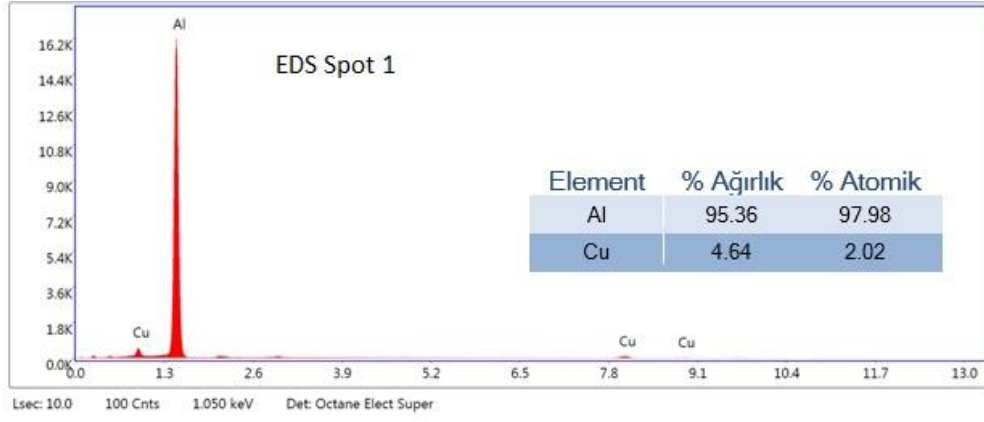


Şekil 3.27 : 19-25 µm eloksal kaplı numunenin SEM görüntüsü.

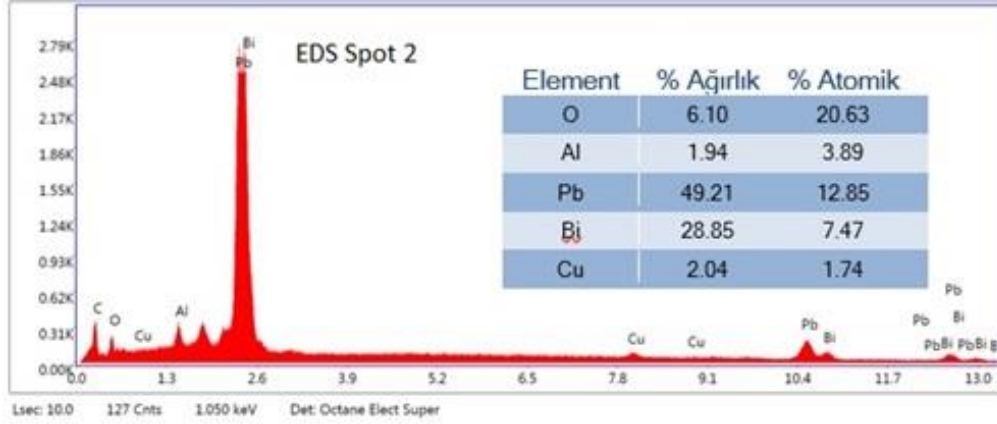
Eloksal kaplı olmayan ve korozyon çatlağı olan bölgelere yapılan EDS analizleri Şekil 3.28, Şekil 3.29, Şekil 30, Şekil 3.31 ve Şekil 32’de gösterilmiştir.



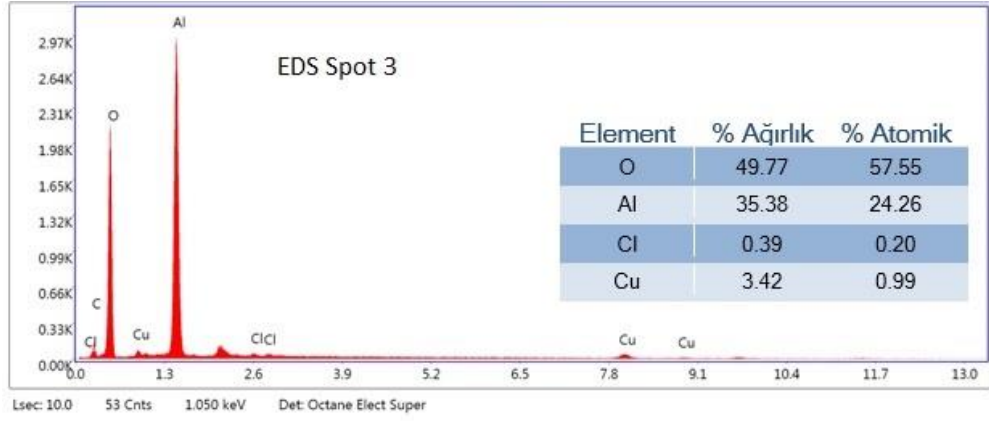
Şekil 3.28 : Elokسال kaplı olmayan numuneden EDS alınan bölgeler.



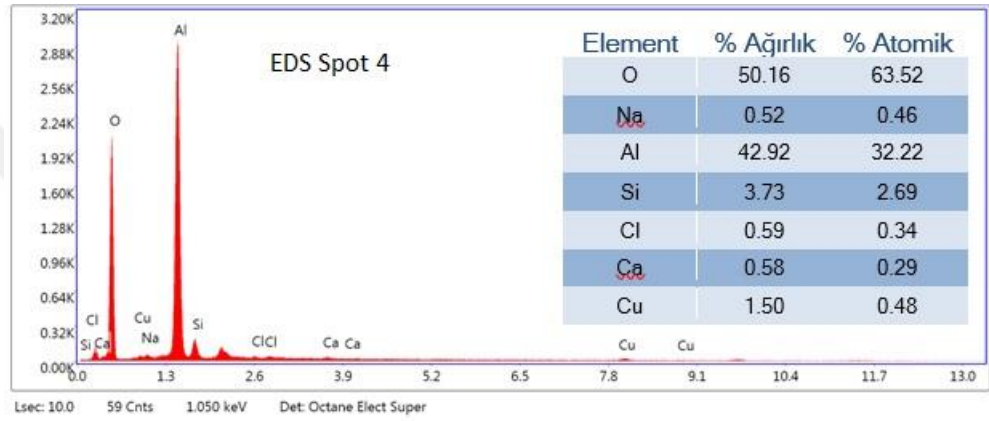
Şekil 3.29 : Şekil 3.28'deki 1 no'lu bölgenin EDS analizi.



Şekil 3.30 : Şekil 3.28'deki 2 no'lu bölgenin EDS analizi.



Şekil 3.31 : Şekil 3.28'deki 3 no'lu bölgenin EDS analizi.



Şekil 3.32 : Şekil 3.28'deki 4 no'lu bölgenin EDS analizi.

Korozyona alma işlemi Na ve Cl içeren ortamda yapıldığından bu piklerle karşılaşılmıştır. Analiz yapılan diğer noktalarda ise, 2011 alaşımının da içeriğinde bulunan Cu, Pb ve Bi elementleri gözlemlenmiştir. Elokسال kaplamanın korozyon direncine yüksek oranda katkı sağladığı söylenebilmektedir.



4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğalgaz valfleri dişi ve erkek olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Valf gibi sızdırmazlık istenen yerlerde kullanılmasından dolayı bu iki parçanın tolerans aralığı oldukça düşüktür. Bu nedenle, iki parça da aynı tezgaha bağlanarak çok yüksek hızlarda işlenmektedir. Dolayısıyla valf sanayisi gibi sektörlerde yüksek işlenebilir malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Alüminyum alaşımları, sahip olduğu hafiflik, ekonomik karşılaştırılabilirlik, geri dönüştürülebilirlik, yüksek korozyon direnci, yüksek işlenebilirlik gibi avantajları sayesinde valf sanayisi için önemini giderek artırmaktadır.

Bu çalışmada, valf sanayisinde kullanılabilecek iyi işlenebilir alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi ve kullanılması üzerine çalışılmıştır. Bu kapsamda, direkt soğutmalı döküm yöntemiyle 2011 biyetleri dökülmüş ve homojenize edilmiştir. Yapılan işlemi takiben biyetler ekstrüze edilmiş ve mukavemet kazandırmak adına ısıtıl işlem uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, üretilen profillere eloksall kaplanarak korozyon davranışı incelenmiştir.

1. 2011 alaşımı içerisindeki düşük ergime sıcaklığına sahip bizmut ve kurşun elementleri birlikte faz oluşturarak alüminyum matrisi içerisinde tane sınırlarına çökelmektedir. Talaşlı imalat sırasında bu fazların düşük sıvılaşıma sıcaklığı nedeniyle malzemenin çok kolay işlenebilme kabiliyeti artmaktadır. Dolayısıyla yüksek işlenebilirlik talep edilen alanlarda 2011 alaşımı beklentiyi karşılayabilmektedir.
2. Doğrudan ani soğutmalı döküm işlemi ile üretilen biyetlerden alınan kimyasal analiz sonuçları alaşımın homojen olarak dökülebildiğini göstermiştir.
3. Üretilen ve homojenizasyonu yapılan biyetler üzerinde gerçekleştirilen DSC analizleri ve mikro yapı incelemeleri, homojenizasyon sıcaklığının yeterli olmadığını göstermiştir.

4. Ekstrüze edilen profillere yapılan sertlik testleri, profillerin T4 koşullarının uygun olmadığını ve ilave ısıtım işlem çalışmasının yapılması gerektiğini göstermiştir.
5. T6 ısıtım işlem yapılmış numunelerin çekme testi sonuçlarına göre profillerin akma ve çekme mukavemetleri TS EN 755-2 standardına uygun olduğu belirlenmiştir (Ortalama Akma: 261 MPa, Ortalama Çekme: 396 MPa).
6. 2011 alaşımının ekstrüzyon işlemi incelendiğinde, ekstrüzyon hızının 1,7 mm/sn üzerinde olduğu durumlarda profil yüzeyinde hatalarla karşılaşmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan faydalanılarak, homojenizasyon sıcaklıkları değiştirilerek daha yüksek hızlarda üretim denemelerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.
7. Yapılan SEM incelemeleri ve EDS analizleri sonucunda malzeme mikro yapısında alüminyum ve bakır elementlerinin birlikte çökeltiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu çökeltiler 2xxx serisi alüminyum alaşımlarının mukavemet artırıcı fazı olan Al_2Cu fazlarından kaynaklanmaktadır.
8. Korozyon testleri incelendiğinde, eloksal kaplama kalınlığının artışı ile korozyon derinliğinde 2/5 oranında azalma meydana gelmiştir ve korozyon direnci artırılmıştır. İlerleyen çalışmalarda kaplama kalınlığının optimize edilmesi için araştırmalar yapılması önerilmektedir.
9. C38500 pirinç alaşımından üretilen valflerin, 2011 alüminyum alaşımı kullanılarak üretilmesi durumunda %66 ağırlık azaltılmasının mümkün olduğu belirlenmiştir.
10. Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan faydalanılarak üretilen valflerin sızdırmazlık testlerinin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Haraldsson, J. & Johansson, M. T.** (2018). Review of measures for improved energy efficiency in production-related processes in the aluminium industry – from electrolysis to recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 525–548.
- [2] **Davies, J. R.** (1993). *ASM Handbook: Aluminium & Aluminium Alloys*, Materials Park, Ohio.
- [3] **Cullen, J. M. & Allwood, J. M.** (2013). Mapping the global flow of Aluminium: from liquid aluminum to end use goods. *Environmental Science and Technology*, 47 (7).
- [4] **Tabereaux, A. T. & Peterson, R. D.** (2014). Aluminium production. In: Seetharaman S, McLean A, Guthrie R, Sridhar S (Eds.), *Treatise on process metallurgy: industrial processes* (pp. 839–917).
- [5] **Tanaka, S., Tanaka, N., Komurasaki, K., Kawashima, R. & Koizumi, H.** (2022). Aluminium particle production on alumina rod surface by continuous-wave laser ablation. *Materials Chemistry and Physics*, 278, 125557.
- [6] **Url-1** <<https://www.grandviewresearch.com>>, date retrieved 10.03.2022.
- [7] **Url-2** <<http://talsad.org.tr/>>, date retrieved 24.05.2022.
- [8] **Grandfield, J. F.** (2011). Ingot casting and Casthouse metallurgy of aluminium and its alloys. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, 83–140.
- [9] **Saha, P. K.** (2005). *Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisi* (E. Keleşoğlu ve Y. Erarslan, Çev.). İstanbul.
- [10] **Url-3** <<https://www.atum.itu.edu.tr/>>, date retrieved 28.02.2022.
- [11] **Huang, Y., Li, Y., Xiao, Z., Liu, Y., Huang, Y. & Ren, X.** (2016). Effect of homogenization on the corrosion behavior of 5083-H321 Aluminium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 673, 73–79.
- [12] **He, L. Z., Li, X. H., Liu, X. T., Wang, X. J., Zhang, H. T. & Cui, J. Z.** (2010). Effects of homogenization on microstructures and properties of a new type Al-Mg-Mn-Zr-Ti-Er alloy, *Materials Science and Engineering*, 527 (29-30), 7510-7518.
- [13] **Du, Q., Poole, W.J., Wells, M.A. & Parson, N.C.** (2013). Microstructure evolution during homogenization of Al-Mn-Fe-Si alloys: modeling and experimental results, *Acta Materialia*, 61 (13), 4961-4973.
- [14] **Dixon, B.** (2000). Extrusion of 2xxx and 7xxx alloys, *ET '2000. Proceedings of the 7th International Aluminium Extrusion Technology Seminar*, (pp.281-294). Chicago, USA,

- [15] **Erdoğan, M.** (1996). *Al-Li-Cu-Mg Alaşımlarında Yaşlandırma Mekanizması ve Isıl işlemi*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] **Brooks, C. R.** (1991). Principles of Heat Treating of Nonferrous Alloys. In G. E. Totten (Ed.), *ASM Handbook: Heat Treating*, (vol. 4, pp.1826-1844). Washington.
- [17] **Pernick, J.** (1978). Aluminum Anodizing. In S. D. Cramer, B. S. Covino (Eds.), *ASM Handbook: Corrosion* (vol. 13, pp.895-917). Washington.
- [18] **Takahashi, H.** (2003). Aluminum Anodizing. In S. D. Cramer, B. S. Covino (Eds.), *ASM Handbook: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, (vol. 13A, pp.736-740). Washington.
- [19] **Erkmen, Z. E.** (2012). *Modern fizik takviyeli Malzeme Karakterizasyonu ve Temel İlkeleri*. İstanbul.
- [20] **Xue, Y., Hu, W. & Hu, X.** (2020). Thermal analysis of natural fibers. *Thermal Analysis of Textiles and Fibers*, 105-132.
- [21] **Gale, W. F. & Totemeier, T. C.** (2004). Metallography. In W. F. Gale, T. C. Totemeier (Eds.), *Smithells Metals Reference Book* (8th ed., pp.10-1-10-87). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750675093500130>
- [22] **Singh, M. K. & Singh, A.** (2022). *Characterization of polymers and Fibres*. San Diego, Ca.
- [23] **Leyden, D. E.** (1986). X-Ray Spectrometry. In Thomas J. Bruno, Ryan Deacon, Jeffrey A. Jansen, Neal Magdefrau, Erik Mueller, Dehua Yang (Eds.) *ASM Handbook: Materials Characterization* (9th ed., Vol. 10, pp.180-207). Washington.
- [24] **Url-4** <<https://www.thermofisher.com>>, date retrieved 01.03.2022.
- [25] **Revankar, G.** (2000). Introduction to Hardness Testing. In H. Kuhn, D. Medlin (Eds.), *ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation* (Vol. 8, pp.416-427). Washington.
- [26] **Holt, J. M.** (2000). Uniaxial Tension Testing. In H. Kuhn, D. Medlin (Eds.), *ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation* (Vol. 8, pp. 297–337). Washington.
- [27] **Url-5** <<https://www.metalurjik.com>>, date retrieved 13.03.2022.
- [28] **Url-6** < <https://www.azom.com>>, date retrieved 03.02.2022.
- [29] **Url-7** < <https://materion.com> >, date retrieved 22.02.2022.
- [30] **Cobden, R.** (1994). Aluminium: Physical properties, Characteristics and Alloys, *European Aluminium Association*. Banbury.
- [31] **Kaufman, J. G.** (1999). *Properties Of Aluminium Alloys: Tensile, Creep, And Fatigue Data At High And Low Temperatures*. Ohio.
- [32] **Jeffrey, S.** (1996). Fatigue Strength of Aluminum Alloy Welds, S. Lampman (Ed.) *ASM Handbook: Fatigue and Fracture* (Vol. 19, pp.2106-2118). Washington.

- [33] **Vanian, G. G., Hellier, A. K., Zarrabi, K., Prusty, G. B.** (2013). Fracture Toughness Determination for Aluminium Alloy 2011-T6 using Tensile Notched Round Bar (NRB) Test Pieces. *International Journal of Fracture*, 181, 147–154.
- [34] **Oberhausen, G., Zhu, Y. & Cooper, D. R.** (2022). Reducing the environmental impacts of Aluminium extrusion. *Resources, Conservation and Recycling*, 179, 677-682.
- [35] **Zheng, H. & Liu K.** (2015). Machinability of Engineering Materials. In Andrew Y.C. Nee (Ed.) *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology* (Vol. 4). London.
- [36] **Koch, S. & Antrekowitsch, H.** (2011). Investigations of lead-free aluminium alloys for machining. *World of Metallurgy*, 64 (1), 26-30.
- [37] **Davis, J. R.** (2001). *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys*, Ohio.
- [38] **Mishra, R. S. & Sidhar, H.** (2016). Physical Metallurgy of 2XXX Aluminium Alloys. *Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys including Al-Li Alloys* (1st ed.). Oxford.
- [39] **Garcia, P., Rivera, S., Palacios M. & Belzunce, J.** (2010). Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses, *Engineering Failure Analysis*, 17 (4), 771–776.
- [40] **Fadhil, A. A., Ghattas, M. S., Iskander, B. A., Ajeel, S. A. & Enab, T. A.** (2018). Structural characterization and detecting processes of defects in leaded brass alloy used for gas valves production. *Alexandria Engineering Journal*, 57 (3), 1301–1311.
- [41] **Ashby, M.** (2009). *Teach Yourself Phase: Diagrams and Phase Transformation*, (5th ed.). Cambridge.
- [42] **Suarez, L., Rodriguez, P., Cabrera, J. M., Martinez, A., Majuelos, D. & Coma, A.** (2015). Hot Working Analysis of a CUZN40PB2 brass on the monophasic (β) and intercritical ($\alpha+\beta$) regions. *Materials Science and Engineering: A*, 627, 42–50.
- [43] **El-Bahloul, A. M., Samuel, M. & Fadhil, A.** (2016). Copper-zinc-lead alloys, common defects through production stages and remedy methods, *Online Journal of Science and Technology*, 5 (2). 17-22.
- [44] **Url-8** <[https:// alloys.copper.org /alloy/C38500](https://alloys.copper.org/alloy/C38500)>, date retrieved 03.01.2022.
- [45] **Url-9** <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Al-Cu-phase-diagrampartial-greek.svg>>, date retrieved 24.05.2022.
- [46] **Esteban, G., Martinez, E., Segurado, J., Capolungo, L. & LLorca, J.** (2019). An atomistic investigation of the interaction of dislocations with Guinier-Preston zones in Al-Cu Alloys. *Acta Materialia*, 162, 189–201.
- [47] **Ringer S. & Hono, K.** (2000). Microstructural evolution and age hardening in aluminium alloys: atom probe field-ion microscopy and transmission electron microscopy studies, *Material Characterization*, 44, 101-131.
- [48] **Hardouin, O.** (2004). Alfred Wilm and the beginnings of Duralumin. *Revue De Métallurgie*, 101 (5), 353–360.

- [49] **Bartges, et al.** (2000). *U.S. Patent No. 5,522,950*. Pittsburgh, Pa: U.S. Patent and Trademark Office.
- [50] **Vargel, C.** (2020). 2xxx Series Alloys. *Corrosion of Aluminium* (2nd ed., pp.453–463). Amsterdam: Elsevier.
- [51] **Url-10** <<https://www.azom.com/article>>, date retrieved 03.02.2022.
- [52] **Url-11** <<https://www.mecholic.com/>>, date retrieved 08.03.2022.
- [53] **Url-12** <<http://www.atateknik.com.tr>>, date retrieved 21.03.2022.
- [54] **Baragetti, S., Lusvarghi, L., Bolelli, G. & Tordini, F.** (2009). Fatigue behaviour of 2011-T6 aluminium alloy coated with PVD WC/c, PA-CVD DLC and Pe-CVD SiO₂ Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 203 (20-21), 3078–3087.
- [55] **Mohin, M. A., Toofanny, H., Babutskyi, A., Lewis, A. & Xu, Y. G.** (2016). Effect of electromagnetic treatment on fatigue resistance of 2011 Aluminium alloy. *Journal of Multiscale Modelling*, 07 (03), 1650004.
- [56] **Latif, A., Ingarao, G. & Fratini, L.** (2022). Multi-material based functionally graded billets manufacturing through friction stir consolidation of aluminium alloys chips. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 71 (1), 1-4.
- [57] **Seidi, E. & Miller, S. F.** (2021). Lateral friction surfacing: Experimental and metallurgical analysis of different aluminum alloy depositions. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5948–5967.
- [58] **Gavali, M. & Aksakal, B.** (1998). Effects of various homogenisation treatments on the hot workability of Ingot Aluminium Alloy AA2014. *Materials Science and Engineering: A*, 254 (1-2), 189–199.
- [59] **Segreto, T., Simeone, A. & Teti, R.** (2014). Principal component analysis for feature extraction and NN Pattern Recognition in sensor monitoring of chip form during turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7 (3), 202–209.
- [60] **Yavuz, M., Gökçe, H. & Şeker, U.** (2017). Matkap Geometrisinin Takım Aşınması ve Talaş Oluşumu Üzerine Etkisinin Araştırılması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (1), 11–19.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İlyas Artunç SARI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021-Halen ASAŞ Alüminyum / Ar-Ge Mühendisi

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Effect of Anodizing Thickness on Corrosion Behaviour of 2011 Aluminium Alloy