

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

3005 ALÜMİNYUM ALAŞIMI LEVHALARIN DERİN ÇEKİLME
KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI

Yusuf ÖZÇETİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Aralık, 2021

Danışmanım Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan 3005 Alüminyum Alaşımı Levhaların Derin Çekilme Kabiliyetinin Araştırılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yusuf ÖZÇETİN

İmza

Dostlarıma,

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde tüm imkanlarını benim kullanımına sunan ASAŞ Alüminyum’a teşekkürlerimi borç bilirim. Danışman hocam Sn. Kerem Altuğ GÜLER’e her zaman bana gösterdiği anlayış için, Sn. Canan İNEL’e müthiş bilgi birikimiyle verdiği destekler, Sn. Ali ULUS’a yönlendirmeleri, Sn. Onur BİRBAŞAR’a verdiği katkı ve Sn. Feyza DENİZLİ ve Sn. Çisem DOĞAN’a ise her zaman desteklerini esirgemedikleri için sonsuz şükranda bulunurum. Tüm proseslerin deneysel süreçlerini gerçekleştirmede yoğun emeği bulunan Sn. Samet Sevinç’e ise ayrı bir parantez açıp teşekkürlerimi iletirim.

Ayrıca benim her zaman yanımda olan dostlarım ve aileme teşekkür ederim.

Yusuf ÖZÇETİN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
2 ALÜMİNYUMUN TARİHİ, ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİMİ	4
2.1 Alüminyumun Tarihçesi	4
2.2 Alüminyumun Özellikleri	5
2.3 Alüminyum Alaşımı Serileri	8
2.3.1 Çökelme sertleşmesi göstermeyen dövme alüminyum alaşımı serileri	8
2.3.2 Çökelme sertleşmesi gösteren dövme alüminyum alaşım serileri	9
2.3.3 Döküm Alaşımları	11
2.4 Birincil Alüminyum Üretimi	13
2.4.1 Bayer Prosesi	14
2.4.2 Hall-Heroult Prosesi	17
3 SÜREKLİ LEVHA ÜRETİM METODU	20
3.1 İkiz Merdaneli Döküm Yöntemi	20
3.2 Soğuk Haddeleme	24
3.3 Tavlama Isıl İşlemleri	25
4 DERİN ÇEKME İŞLEMİ	26
4.1 Prosese Etki Eden Parametreler	28
4.1.1 Malzeme	28
4.1.2 Kalıp geometrisinin etkisi	32
4.1.3 İşlem koşulları	32
4.2 Derin çekme işlemindeki yaygın hatalar	33
4.2.1 Kırışma	33
4.2.2 Portakal kabuğu	33

4.2.3 Çatlamalar	34
4.2.4 Kulaklanma	35
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
5.1 Teçhizat ve Malzeme	38
5.2 Prosesler	39
5.3 Karakterizasyon Çalışmaları	41
6 SONUÇLAR VE TARTIŞMA	42
6.1 Mikroyapı İncelemeleri	42
6.2 Mekanik Özellik İncelemeleri	51
6.3 Erichsen Çökertme Testleri	55
6.4 Erichsen Derin Çekme Testi	59
7 GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKÇA	67
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	70

SİMGE LİSTESİ

$\bar{R}$	Dikey anizotropi değeri
ΔR	Düzlemsel anizotropi
$^{\circ}C$	Santigrad
μm	Mikrometre
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Fe	Demir
Fe	Demir
Fe	Demir
h	Ortalama derin çekilmiş parça yüksekliği
hp	Ortalama kulak tepesi yüksekliği
hv	Ortalama kulak çukuru yüksekliği
L	Longitudunal (Boyuna)
m	Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
n	Deformasyon sertleşmesi üssü
r	Dikey anizotropi katsayısı
rm	Matris kenar yarıçapı
rst	Istampa kenar yarıçapı
Si	Silisyum
T	Transverse
Z	Kulaklanma yüzdesi
ϵt	Kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme
ϵt	Kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme
ϵw	Enine doğrultuda gerçek şekil değiştirme
ϵw	Enine doğrultuda gerçek şekil değiştirme

KISALTMA LİSTESİ

TRC	Twin roll casting (İkiz merdaneli döküm yöntemi)
DC	Direct chill casting (Direkt soğutmalı döküm yöntemi)
K.Y.	Kulaklanma Yüzdesi
BF	Bright field (Aydınlık alan)
mm	Milimetre
kg	Kilogram
µm	Mikrometre
MHS	Merkez hattı segregasyonu
BSE	Geri saçılmış elektron

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Alüminyumun genel özellikleri.....	6
Şekil 2.2 Bayer Prosesi üretim akış şeması.....	15
Şekil 2.3 Boksitten alüminyuma üretim akış şeması.....	17
Şekil 2.4 Soderberg ve Prebake elektroliz hücre sistemleri.....	18
Şekil 3.1 İkiz merdaneli döküm yönteminin şekilsel gösterimi ve döküm sisteminin bölümleri.....	21
Şekil 3.2 İkiz merdaneli döküm sırasındaki gerçekleşen katılaşma durumu.....	22
Şekil 3.3 İkiz merdaneli döküm sonrası bobin şeklinde sarılmış alüminyum rulo...	23
Şekil 3.4 Soğuk haddelemenin şematik gösterimi.....	24
Şekil 4.1 Derin çekme işleminin şematik gösterimi.....	26
Şekil 4.2 Derin çekme ile üretilmiş bazı ürünler.....	27
Şekil 4.3 Erichsen çökertme testi düzeneği.....	29
Şekil 4.4 Erichsen çökertme testi sonrası yırtılmış numune.	29
Şekil 4.5 Bir sac malzemedeki hadde yönüne göre mekanik test numuneleri.	30
Şekil 4.6 Çekme numunesinde birim şekil değiştirmeler.....	31
Şekil 4.7 Derin çekme işlemi sonrası oluşan kırışma.....	33
Şekil 4.8 Derin çekme işlemi sonrası yüzeyde oluşan portakal kabuğu durumu. ..	34
Şekil 4.9 Derin çekme işlemi sonrası çatlama.....	35
Şekil 4.10 Hadde yönüne göre oluşan farklı kulaklanma durumları. a) kulaklanma yok, b) 0 ve 90 derece kulaklanması, c) 45 derece kulaklanması.	37
Şekil 5.1 Deneylerde uygulanan prosesler.....	41
Şekil 6.1 Mikroyapıları için döküm veya hadde yönüne göre hazırlanan numunelerin yönleri.....	42
Şekil 6.2 3005A ve 3005B alaşım levhaların polarize ve BF ışık altında döküm mikroyapıları.....	43
Şekil 6.3 3005A ve 3005B alaşımı için homojenizasyon tavı öncesi BF ve polarize mikroyapılar.....	45
Şekil 6.4 3005A ve 3005B alaşımı için homojenizasyon tavı sonrası BF ve polarize mikroyapılar.....	46
Şekil 6.5 3005A ve 3005B levhaları için Proses 1’de 1mm’de uygulanan ara tav öncesi ve sonrası polarize mikroyapılar.....	47
Şekil 6.6 3005A ve 3005B levhaları için Proses 2’de 2mm’de uygulanan ara tav öncesi ve sonrası polarize mikroyapılar.....	48
Şekil 6.7 3005A ve 3005B levhaları için nihai tav öncesi ve sonrası polarize mikroyapılar.....	50

Şekil 6.8 Levhaların nihai kalınlıktaki Erichsen çökertme testi sonrası stereo mikroskop görüntüleri.....	57
Şekil 6.9 Levhaların nihai kalınlıktaki Erichsen çökertme testi yırtılma yüzeyinden çekilmiş SEM görüntüsü.....	58
Şekil 6.10 3005A alaşımındaki derin çekilmiş numuneler ve kulaklanma grafiklerinin görüntüsü.(a=Proses 1, b=Proses 2, c=Proses 3)	61
Şekil 6.11 3005B alaşımındaki derin çekilmiş numuneler ve kulaklanma grafiklerinin görüntüsü.(d=Proses 1, e=Proses 2, f=Proses 3).....	61

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Alüminyum kullanım alanları.....	7
Tablo 3.1 İkiz merdaneli döküm yöntemiyle üretilebilen bazı alaşımlar.	23
Tablo 5.1 Deney süreçleri boyunca kullanılan teçhizat ve malzeme listesi.	38
Tablo 5.2 Deneysel süreçte kullanılan, magnezyum oranı farklılık gösteren iki 3005 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağı.).....	39
Tablo 6.1 3005A ve 3005B levhalarının proseslerine ait nihai yapıdaki ortalama tane boyutları.....	51
Tablo 6.2 3005A levhası için Proses 1 sonrası nihai mekanik özellikler.	52
Tablo 6.3 3005A levhası için Proses 2 sonrası nihai mekanik özellikler.	52
Tablo 6.4 3005A levhası için Proses 3 sonrası nihai mekanik özellikler.	52
Tablo 6.5 3005B levhası için Proses 1 sonrası nihai mekanik özellikler.	53
Tablo 6.6 3005B levhası için Proses 2 sonrası nihai mekanik özellikler.	53
Tablo 6.7 3005B levhası için Proses 3 sonrası nihai mekanik özellikler.	54
Tablo 6.8 3005A ve 3005B levhası için prosesler sonrası Erichsen çökertme testi değerleri.....	56
Tablo 6.9 Tüm proseslerdeki kulaklanma yüzdesi ve düzlemsel anizotropi değeri karşılaştırmaları.....	62

3005 ALÜMİNYUM ALAŞIMI LEVHALARIN DERİN ÇEKİLME KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI

Yusuf ÖZÇETİN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

3005 alüminyum alaşımı endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşım özellikle derin çekme uygulamalarına yatkın olduğundan; levha presleme ile üretilmiş derin kap tarzı ürünler elde edilebilmektedir. Bu çalışmada; ikiz merdaneli döküm yöntemiyle düşük ve yüksek magnezyumlu olmak üzere 2 farklı 3005 alaşımı dökümü yapılmıştır. Bu alaşımlar farklı termomekanik proses işlemlerine tabii tutulmuştur. Bu proseslerde ara tav işleminin nihai derin çekme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ara tav işlemleri 1 mm ve 2 mm kalınlıklarda uygulanmıştır. Bir proste de ara tav işlemi uygulanmamıştır. Proseslerden bağımsız olarak ise iki alaşım arasındaki %0,2'lik magnezyum elementi farkının derin çekme özelliklerine etkisi de incelenmiştir.

Çalışmada, optik mikroskoptan elde edilme polarize ve BF mikroyapılar, 3 yönlü çekme testi sonuçları, Erichsen çökertme ve Erichsen derin çekme testleri uygulanarak numuneler karakterize edilmiştir. Derin çekme davranışı açısından sonuçlar değerlendirilmiştir. Ara tav içeren ve içermeyen prosesler açısından derin çekme davranışı incelendiğinde ara tavsız proste en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Magnzeyumu fazla olan alaşıma ait levhaların proseslerinde ise düşük olan levhaya göre derin çekilebilme davranışının geliştiğı görölmüşür.

Anahtar Kelimeler: 3005, alüminyum, derin çekme

INVESTIGATION OF THE DEEP DRAWING CAPABILITY OF 3005 ALUMINIUM ALLOY PLATES

Yusuf ÖZÇETİN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

3005 aluminium alloy is widely used in different industries. Since this alloy is particularly prone to deep drawing applications; It is possible to obtain deep cup style products produced by plate pressing. In this study; 2 different 3005 alloys, low and high magnesium, were cast by twin roll casting method. These alloys were subjected to different thermomechanical processes. In these processes, the effect of intermediate annealing on the final deep drawing properties was investigated. Intermediate annealing processes were applied in 1 mm and 2 mm thicknesses. Intermediate annealing was not applied in a process. Regardless of the processes, the effect of the 0.2% magnesium element difference between the two alloys on the deep drawing properties was also investigated.

In the study, the samples were characterized by applying polarized and BF microstructures obtained from optical microscope, 3-way tensile test results, Erichsen cupping and Erichsen deep drawing tests. The results were evaluated in terms of deep drawing behavior. When the deep drawing behavior is examined in terms of processes with and without intermediate annealing, the best results were

obtained in the process without intermediate annealing. On the other hand, in the processes of the plates of the alloy with high magnesium, it was observed that the deep drawing behavior improved compared to the plate with low magnesium content.

Keywords: 3005, aluminium, deep drawing

1.1 Literatür Özeti

Alüminyum levha olarak çok farklı sektörlerde yıllardır kullanılmaktadır. Otomotiv, ambalaj, ısıtma-soğutma, mimari yapılar gibi sektörler yassı mamül kullanım alanlarının başını çekmektedir. Alüminyum aynı zamanda sahip olduğu iyi şekillendirilebilirlik özellikleri sayesinde presle şekillendirilip üretilen parçalarda da büyük bir paya sahiptir. Derin çekme işlemi uygulanarak, otomotivlerde ısı kalkanı, gıda sanayiinde yemek kapları, dekoratif ürünlerde ise mum kabı olarak üretimi gerçekleştirilir. [1]

3005 alüminyum alaşımı derin çekme işlemine en uygun alüminyum alaşımlarından biridir. İçerdiği ana alaşımlandırma elementi olan mangan sayesinde şekillendirilebilmesi iyi bir şekilde gerçekleşir. Aynı zamanda ikincil olarak içerdiği %0,5 seviyesindeki magnezyum da derin çekme özelliklerini etkiler ve geliştirir. [2]

Gülver M., yaptığı tez çalışmasında DC (direkt soğutmalı) döküm yöntemiyle dökülmüş ve ardından sıcak haddelenmiş referans kaynaktan ve kendi çalışmasında şirketi bünyesinde ikiz merdaneli döküm yöntemiyle ürettiği levhalar üzerinden proses çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmasında, farklı döküm kalınlıklarında 3005 alaşım levhalar üzerinden farklı termomekanik prosesler gerçekleştirmiştir. İkiz merdaneli döküm yöntemiyle ürettiği levhalara bir prosesinde döküm kalınlığında ve bir prosesine de deformasyon sonrası homojenizasyon tavlama uygulanmıştır. Döküm kalınlığındaki homojen tav sonrası aşırı tane büyümesi görmüşken, deformasyon sonrasındaki tavlamada ince ve eş eksenli tanelerin varlığını göstermiştir. DC yöntemi ile üretilen levhalarda ise nihai yapıda rekristalize olmuş tane yapısı olduğundan bahsetmiştir. İkiz merdaneli döküm yapısında homojenizasyon işlemine tabii tutulmayan levhalarda ise nihai yapıda rekristalize yapının görülmediğini bildirmiştir. Homojenizasyon tavına sahip proseslerde ise nihai yapıda yeniden kristallenmiş yapının görüldüğünü ortaya çıkarmıştır. 0, 45 ve 90 derece yönlerindeki üç yönlü çekme testi sonuçlarında ise

ΔR ve $\bar{R}$ değerlerini incelediğinde; 7,7 mm döküm kalınlığına ve deformasyon sonrası homojenizasyon uyguladığı proste neredeyse hiç kulaklanma davranışı göstermediğini ileri sürmüştür. Aynı zamanda bu prosese ait numunelerin en yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyetine sahip olduğunu açıklamıştır. [3]

Doğan Ç., yaptığı tez çalışmasında 3005 alüminyum alaşıımı (AlMn1Mg0.5) için 2 farklı proses uygulayıp, sonuçlarını değerlendirmiştir. İlk prosesinde döküm kalınlığında homojen tav, ikinci prosesinde ise %25 deformasyon sonrası homojenizasyon tavi işlemini uygulamıştır. Döküm kalınlığında homojenizasyon tavi yaptığı proste yüzeye yakın tanelerde aşırı kabalaşma durumunu gözlemlemiştir. %25 deformasyon sonrası homojenizasyon tavi yaptığı proste ise daha uniform eş eksenli tanelerin olduğunu görmüştür. Anizotropi sonuçlarına baktığında ise %25 deformasyon uyguladığı prosese ait değerleri döküm kalınlığında homojenizasyon yaptığı prosese göre daha düşük okumuştur. Dolayısıyla da deformasyon sonrası homojenizasyon uyguladığı prosesin derin çekilebilme kabiliyetinin daha iyi olduğunu öne sürmüştür. [4]

Yumuşak C. ise yaptığı tez çalışmasında 3005 ile aynı alaşım ailesinden olan 3104 alaşımında derin çekme kabiliyetini etkileyen faktörleri görmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. İkiz merdaneli döküm yöntemiyle üretilmiş döküm kalınlığı 7,20 mm olan levhalardan %40 deformasyon oranıyla haddeleme gerçekleştirdiği ve ardından homojenizasyon tavi uyguladığı prosesin diğer tüm proseslerden daha iyi izotropik özellikler gösterdiğini öne sürmüştür. [5]

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde; 3005 alüminyum alaşımında derin çekme özelliklerinin birkaç değişken üzerinden araştırılması hedeflenmiştir. Literatürde daha öncesinde homojenizasyon tavi etkisi çokça araştırıldığı için; uygulanan deneysel proseslerde homojenizasyon tavinin yeri ve sıcaklığı sabit tutulmuştur. Bu tezde; ara tavin varlığının ve var olduğu proseslerdeki termomekanik konumunun etkisinin derin çekme özelliklerine nasıl tesir ettiği araştırılmak istenmiştir. Ayrıca aynı prosesler 3005 alüminyum alaşım standartının izin verdiği aralıkta, magnezyum oranın değiştirilmesi sonucu üretilen 2 farklı levhaya uygulanmıştır. Düşük ve yüksek

magnezyumlu iki farklı 3005 levhanın derin çekme özelliklerine nasıl etki yarattığı da çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılmak istemiştir. Derin çekme özelliklerinin gelişmesinde; hangi faktörün daha baskın rol aldığına da belirlenmesi istenmiştir.

1.3 Hipotez

3005 alüminyum alaşımında derin çekilebilme kabiliyeti doğrudan termomekanik proseslerle ilintili olduğu bilinmektedir. Döküm kalınlığında homojenizasyon tavı gerçekleştirmek, taneleri haddinden fazla büyüteceğinden anizotropik özellikleri kötü etkileyecektir. Deformasyon sonrası homojenizasyon tavı uygulanması özellikle yüzey tanelerinin büyümesini engelleyecek ve kesit genelinde ince taneli yeniden kristalleşmiş yapıya izin verecektir. Düzlemsel anizotropi değerinin sıfırdan artı yönde yüksek çıkması durumunda 0 ve 90 derece kulaklanması, sıfırdan eksi yönde yüksek çıkmasında ise 45 derece kulaklanmasına sebebiyet vereceği bilinmektedir. Ara tavin kulak oluşum mekanizmasını direkt olarak etkilediği ve kulakların hangi yönde oluşacağını belirlemede önemli faktörlerden biri olduğu söylenebilir. Magnezyumun artması ile birlikte anizotropik durumun iyileşmesi beklenmektedir. Ayrıca baskın hadde tekstürünün 45 derece kulaklanması, baskın rekristalizasyon tekstürünün de 0 ve 90 derece kulaklanması tetiklediği okunmuştur. Termomekanik prosesler optimize edilerek kulak oluşumu minimize edilebilir.

2 ALÜMİNYUMUN TARİHİ, ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİMİ

2.1 Alüminyumun Tarihçesi

Alüminyum 1807 senesinde Sir Humprey Davy tarafınca ilk kez oksit bileşiğinden ayrıştırılarak elde edilmiştir.[6]1886'da Charles Martin Hall ve Paul T. Heroult'un birbirlerinden habersiz olarak icra ettikleri elektroliz yönteminin kullanılmaya başlanması ile geçilmiştir Böylelikle elektroliz ile üretimin keşfedilmesinden günümüze gelen süreçte alüminyum üretimi dünyada, senelik 13 ton'dan, 64 milyon ton'un üstüne terfi etmiştir ve demir-çelikten sonra en çok kullanılan ikinci metal olmuştur. [7] Üretim miktarlarının artışıyla alüminyumun ünite fiyatı ilk çıkmış olduğu yıllarda altın, gümüş ve benzer biçimde değerli metaller sınıfında yer almasına rağmen, şu an bakır ile karşılaştırılabilir düzeye gerilemiştir. Üretim miktarlarına bakıldığında alüminyum, çelikten sonra ikinci sırayı alır. [8] Alüminyum, hafifliği kolay işlenebilirliği, iletken olması, mukavemeti ve korozyon direnci gibi diğer metallere göre sahip olduğu özellikleri sebebiyle birçok alanda tercih edilen bir metaldir. Saf olarak kullanılabildiği gibi, alaşım olarak da kullanılabilmektedir. Çeşitli etkileri minimuma indirmek maksadıyla alüminyuma çok fazla alaşım elementleri eklenebilmektedir. [9]

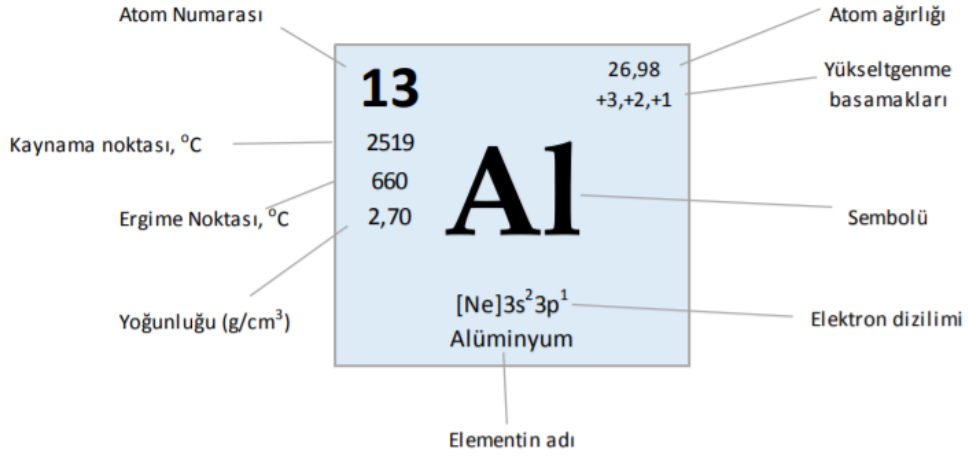
Birincil alüminyum üretimi genç bir endüstridir. 150 yıldan biraz daha eskiye dayanmaktadır. Alüminyum endüstrisi, ilk yarım yüzyılı boyunca, metalin fiyatını düşürmek ve aynı zamanda geniş bir pazar yelpazesinde alüminyumun değerini ve fizibilitesini kanıtlamak için üretim süreçlerini iyileştirme ve genişletme gibi ikili bir rol üstlendi. Endüstrinin bu soruna dinamik yaklaşımı öyleydi ki, alüminyum tüketimi her on yılda bir ikiye katlanarak kayda değer bir rekor kırdı. Alüminyuma yönelik güçlü talep, bunu karşılamak için üretim kapasitesinin hızla genişlemesini teşvik etti. Birinci Dünya Savaşı, alüminyum üretimi ve tüketimi üzerinde dramatik bir etkiye sahipti. 1914 ile 1919 arasındaki beş yılda, dünya üretimi yılda 70.800 tondan 132.500 tona yükseldi ve savaşın yol açtığı çok büyük genişlemeden sonra zeminin tutulduğu metalin uyarlanabilirliğinin çarpıcı bir kanıtıdır. Sivil üretime

geçiş bir kez gerçekleştirildikten sonra, artan kapasite çok geçmeden sanayinin normal taleplerini karşılamakla meşgul oldu. Ve bu, İkinci Dünya Savaşı'nın bir sonucu olarak çok daha büyük bir ölçekte tekrar oldu. Dünya birincil alüminyum üretimi 1939'da 704.000 tondan 1943'te 1.950.000 tona yükseldi ve ardından önemli ölçüde azaldı. İkinci Dünya Savaşı'nın sonunda, batı dünyası endüstrisi, dört ila beş yıllık bir süre içinde, kapasitesinde eşi görülmemiş bir üç kat genişlemeyi tamamlamıştı. Bu yeni kapasite için sivil pazarların geliştirilmesi gerekiyordu. Alüminyum talebinin sürekli olduğu kanıtlandı ve genişletilmiş tesisler birkaç yıl içinde neredeyse tam kapasiteyle çalışmaya başladı. 1950'ler, 60'lar ve 70'ler boyunca sürekli araştırma ve ürün geliştirme, alüminyum içeren neredeyse sonsuz bir tüketim malları yelpazesine yol açtı. Hafiflik, mukavemet, dayanıklılık, şekillendirilebilirlik, iletkenlik ve işlenebilirlik gibi temel faydaları onu çok aranan bir ürün haline getirdi. Endüstrinin kendisinin alüminyum kullanımına öncülük etmesi gerekliliği, büyük şirketlerde boksit madenciliğinden bazı durumlarda nihai tüketici ürününe kadar entegre bir yapıya yol açtı. Toplam dünya üretimi arttıkça, hammaddeye sahip ülkeler ve özellikle ucuz enerji kaynaklarına sahip ülkeler, diğerlerinin süreci ilerletmesi için birincil metal ile pazara girmeye başladı. Bugün metalin önemli bir kısmı bu şekilde pazarlanmaktadır. [10]

2.2 Alüminyumun Özellikleri

Yer kabuğunun yaklaşık %8.2'si alüminyumdan oluşmaktadır. Bu oranla birlikte alüminyum doğada en çok bulunan metallerin başında gelmektedir. Fakat oksijene olan afinitesi nedeniyle alüminyum yer kürede hiçbir zaman saf halde bulunamaz. Potasyum alüminyum sülfat, sodyum alüminyum silikat, alüminyum silikatlar olarak doğada bulunabilir.

Saf alüminyum, hafifçe mavimsi beyaz bir metaldir ve Al ile sembolize edilmektedir. Atomik ağırlığı 26,981 g/mol'dür. [6] Şekil 1.1'de alüminyumun başlıca özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Alüminyumun genel özellikleri.

Hafif, dayanıklı ve fonksiyonelliği sayesinde günümüzün en önemli mühendislik malzemelerinden biridir. Çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahip olan alüminyum, evlerde, kullandığımız tüm ulaşım araçlarında ve cihazlarda (telefon ve bilgisayar vb.), her türlü kablo, her çeşit dolap, raf, tezgah ve mutfak gereçlerinde çağdaş ortam iç tasarımlarında, ek olarak gıda, sağlık ve kimya şeklinde birçok sektörde kullanılmaktadır. Alüminyum, bina çatı ve cephe kaplamalarında, kapı, pencere ve merdiven yapımında kullanılır. Sağlamlığı yanında haiz olduğu dekoratif görünümü mimar ve mühendislere inşaat sektöründe nitelikli seçenekler sunar. Alüminyum, en kullanışlı ambalaj malzemelerinden birisidir. Homojen yapısı, ince folyo kalınlıklarında üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve rahat şekillenebilmesi onu ülkü bir ambalaj malzemesi yapar. En yaygın kullanıldığı alanlardan birisi de, meşrubat ve bira kutularıdır. Dünyada kullanılan tüm içecek kutularının %80'i alüminyumdan yapılmıştır. Sektörde alüminyum hurda arzının önemli bir kısmı içecek kutularından sağlanmakta olup, dünya ikincil alüminyum üretiminde içecek kutularının payı %30-55 arasında değişmektedir. İçecek kutuları ABD'nde ikincil alüminyum üretiminin ana kaynağıdır. Alüminyum, ulaşım sektöründe taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en mühim malzemelerden birisidir. Alüminyum kullanımının yaklaşık %25'i taşıt araçlarının üretimine aittir. Taşıt araçları ne kadar hafifçe olursa, hareket etmeleri için daha azca enerjiye gerek duyulduğundan alüminyum kullanılan otomobilin daha az miktarlarda yakıt harcamış olduğu anlaşılmıştır. Özellikle otobüs, tren, kamyon şeklinde büyük araçlarda alüminyum kullanılması yüksek yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarının

hafifliği yanı sıra sağlamlığı uçak, vapur ve tekne yapımında kullanımını artırmıştır. Alüminyum yüksek seviyede iletken bir metal olması sebebiyle elektrik ve elektronik sektöründe tercih edilir. Yüksek voltajlı elektrik nakil hatları, yeraltı kabloları, elektrik boruları, motor bobin sarımında ek olarak elektronik aygıt kasaları, şase, yonga, transistör soğutucuları ve veri kayıt disklerinde yaygın biçimde kullanılır.

Tablo 1.1 Alüminyum kullanım alanları.

Otomotiv	Radyatör Motor Parçaları Kaporta
Havacılık	Yapı elemanları Uçak Gövdesi
Raylı Sistemler/Denizcilik	Yük ve yolcu vagonları Tekne Gövdesi
İnşaat	Dış cephe kaplama Çatı sistemleri
Ambalaj	İçecek kutuları Konserve kutuları Aerosol kutuları Folyo Kapak(Lid)
Elektrik	Bara İletkenler Transformatör Kablo

2.3 Alüminyum Alaşımı Serileri

Alüminyum alaşımları işlem ya da dövme ve döküm alaşımları şeklinde iki grupta incelenir. Bu iki kategori de kendi içerisinde; ısı işlem uygulabilen ve uygulanamayan şeklinde iki gruba ayrılır. Bazı alaşım serileri faz çözünürlüklerine bağlı olarak ısı işlemlerden etkilenir. Bu işlemler; çözündürme, su verme ve çökeltme ya da yaşlandırma sertleşmesidir. Dövme ya da döküm alaşımları olsa da bu tür alaşımla ısı işlenebilir olarak bilinmektedir. Diğer dövme alaşımlarının büyük bir çoğunluğu ise termomekanik (deformasyon sertleşmesi ve tavlama) prosesler ile sertleştirilebilir. [11]

2.3.1 Çökeltme sertleşmesi göstermeyen dövme alüminyum alaşımı serileri

-1XXX serisi

Bu alaşım serisi minimum %99 oranında alüminyum içermektedir. Alüminyum oranı en yüksek olan alaşımlar bu seride olmakla beraber, eğer ticari alanlarda kullanılacaksa içerisindeki alaşım elementi oranı %1 seviyesine çıkarılabilmektedir. Çekme mukavemet değerleri çok düşük olan bu alaşımlar, folyo ve kimyasal proses alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar.

-3XXX Serisi

Mangan, 3xxx serisi alaşımların ana alaşım elementidir. Bu alaşımlar genellikle ısı işlem görmezler ancak 1xxx serisi alaşımlardan yaklaşık %20 daha fazla mukavemete sahiptirler. Alüminyuma yalnızca sınırlı bir oranda manganez (yaklaşık %1,5'e kadar) etkili bir şekilde eklenebildiğinden, manganez yalnızca birkaç alaşımda ana element olarak kullanılır. Bununla birlikte, bunlardan biri olan popüler 3003 alaşımı, iyi işlenebilirlik gerektiren orta mukavemetli uygulamalar için genel amaçlı bir alaşım olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. [12]

-4XXX Serisi

4xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementi, gevreklik oluşturmada ergime aralığının önemli ölçüde düşmesine neden olmak için yeterli miktarlarda (%12'ye kadar) eklenebilen silisyumdur. Bu nedenle, alüminyum-silisyum alaşımları kaynak

telinde ve ana metalden daha düşük bir erime aralığının gerekli olduğu alüminyumun birleştirilmesinde sert lehim alaşımları olarak kullanılır. Bu serideki alaşımların çoğu ısıtılma işlemi görmez, ancak ısıtılma işlemi görebilen alaşımların kaynağında kullanıldıklarında, alaşım bileşenlerinin bazılarını alırlar ve bu nedenle ısıtılma işlemi sınırlı bir ölçüde yanıt verirler. Kayda değer miktarda silisyum içeren alaşımlar, anodik oksit kaplamalar uygulandığında koyu griden kömür siyahına dönüşür ve bu nedenle mimari uygulamalar için talep edilir. Alaşım 4032, düşük bir termal genişleme katsayısına ve yüksek aşınma direncine sahiptir; bu nedenle dövme motor pistonlarının üretimi için çok uygundur.

-5XXX Serisi

5xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementi magnezyumdur. Ana alaşım elementi olarak veya manganez ile kullanıldığında sonuç; orta ila yüksek mukavemetli işlenebilir sertleştirilebilir bir alaşımdır. Magnezyum, bir sertleştirici olarak manganezden önemli ölçüde daha etkilidir. Yaklaşık %0.8 Mg, %1.25 Mn'ye eşittir ve oldukça yüksek miktarlarda eklenebilir. Bu serideki alaşımlar, iyi kaynak özelliklerine ve deniz ortamlarında korozyona karşı iyi bir dirence sahiptir. Bununla birlikte, yüksek magnezyum alaşımları için izin verilen soğuk iş miktarına ve güvenli çalışma sıcaklıklarında strese karşı duyarlılığı önlemek için belirli sınırlamalar getirilmelidir. [13]

2.3.2 Çökelme sertleşmesi gösteren dövme alüminyum alaşım serileri

Isıl işlemle dayanıklılığı artırılabilen mekanik işlem alaşımlarıdır. Yaşlandırma yöntemi ile mukavemeti arttırılan bu alaşımlar iki gruba ayrılmaktadır. Orta mukavemet sınıfındaki alaşımlar kaynaklanabilir özellik gösterirken; yüksek dayanım sınıfında yer alan ve genellikle havacılık endüstrisinde tercih edilen alaşımlar düşük kaynaklanabilirlik göstermektedir. Bu gruba dahil olan alaşım grupları, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

-2XXX Serisi

Bakır, 2xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementidir ve genellikle ikincil bir katkı olarak magnezyum bulunur. Bu alaşımlar, optimum özellikleri elde etmek için çözelti ısıtılma işlemi gerektirir; çözeltide ısıtılma işlemi görmüş durumda, mekanik özellikler

düşük karbonlu çeliğinkilere benzer ve bazen onu aşar. Bazı durumlarda, mekanik özellikleri daha da artırmak için çökeltme ısıt işlemleri (yaşlandırma) kullanılır. Bu işlem, uzama kaybıyla birlikte akma mukavemetini arttırır; çekme mukavemeti üzerindeki etkisi o kadar büyük değildir. 2xxx serisindeki alaşımlar, diğer alüminyum alaşımlarının çoğu kadar iyi korozyon direncine sahip değildir ve belirli koşullar altında taneler arası korozyona maruz kalabilirler. Bu nedenle, levha şeklindeki bu alaşımlar genellikle yüksek saflıkta bir alüminyum, 6xxx serisinin bir magnezyum-silisyum alaşımı veya %1 Zn içeren bir alaşım ile kaplanır. Genellikle her iki taraftaki toplam kalınlığın %2 ila %5'i arasındaki kaplama, çekirdek malzemesinin galvanik korumasını sağlar ve böylece korozyona karşı direnci büyük ölçüde artırır. [14]

-6XXX Serisi

6xxx serisindeki alaşımlar, yaklaşık olarak magnezyum silisit (Mg_2Si) oluşumu için gerekli oranlarda silisyum ve magnezyum içerir, bu nedenle ısıt işlem görmelerini sağlar. Çoğu 2xxx ve 7xxx alaşımı kadar güçlü olmasa da, 6xxx serisi alaşımlar iyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, işlenebilirlik ve korozyon direncine sahiptir ve orta kuvvettedir. Bu ısıt işlem görebilen gruptaki alaşımlar, T4 (çözelti ısıt işlem görmüş ve doğal yaşlanmış) temperinde oluşturulabilir ve çökeltme ısıt işlemiyle tam T6 (çözelti ısıt işlem görmüş ve yapay yaşlanmış) özelliklerine şekillendirildikten sonra güçlendirilebilir.

-7XXX Serisi

Çinko, %1 ila %8 miktarında, 7xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementidir ve daha küçük bir magnezyum yüzdesi ile birleştğinde, orta ila çok yüksek mukavemetli çökeltme sertleşmesi gösteren alaşımlar elde edilir. Genellikle bakır ve krom gibi diğer elementler küçük miktarlarda eklenir. Seyreltik skandiyum ilaveleri de özellikleri iyileştirir. 7xxx serisi alaşımlar, gövde yapılarında, mobil ekipmanlarda ve diğer yüksek gerilimli parçalarda kullanılır. Daha yüksek mukavemetli 7xxx alaşımları, stres korozyonu çatlamasına karşı azaltılmış direnç sergiler ve genellikle daha iyi mukavemet, korozyon direnci ve kırılma tokluğu kombinasyonları sağlamak için biraz fazla yaşlandırılmış bir temperde kullanılır.

2.3.3 Döküm Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları, dövme alüminyum alaşımlarınıninkiyle aynı alaşım sistemlerine dayanır, aynı mekanizmalarla (gerilme sertleşmesi hariç) güçlendirilir ve benzer şekilde çökelme sertleşmesi gösteren ve göstermeyen türler olarak sınıflandırılır. En büyük fark, en büyük hacimlerde kullanılan döküm alaşımlarının, dövme alaşımlarının çoğundan çok daha fazla miktarda silisyum alaşım ilavesi içermesidir. Silisyum, yüksek hacimli alüminyum döküm endüstrisinin ticari olarak uygulanabilirliğini kelimenin tam anlamıyla mümkün kılan alaşım elementidir. ~%4'ten ~%12 ötektik seviyesine kadar silisyum içeriği, hurda kayıplarını azaltır, kesit kalınlığında daha büyük varyasyonlarla çok daha karmaşık tasarımların üretilmesine izin verir ve daha yüksek yüzey ve iç kaliteye sahip dökümler verir. Bu faydalar, silisyumun akışkanlığı artırma, çatlamayı azaltma ve büzülme gözenekliliğini en aza indirmek için beslemeyi iyileştirme etkilerinden kaynaklanmaktadır. [11]

-2XX.X

2xx.x alüminyum-bakır alaşımları, tüm döküm alaşımları arasında en yüksek mukavemetlere sahip olan bileşimleri içerir ve bu alaşımlar, bunun baskın bir gereklilik olduğu yerlerde kullanılır. Bu alaşımlar (A201.0, 202.0, 204.0 ve A206.0), yüksek oranda kısıtlayıcı safsızlık (demir ve silisyum) sınırları ile %4 ila 6 Cu ve %0,25 ila 0,35 Mg içerir. Bazı durumlarda ayrıca %0,25 ila 0,35 arasında Mn veya Cr (201.0, A201.0 ve 202.0) içerir. Bu alaşımlar için tam mekanik özellikler ve sürekli yüksek kalite elde etmek için iyi döküm tasarımı ve döküm teknikleri kullanılmalıdır. 2xx.x alaşımları ayrıca yüksek sıcaklıklarda (300 °C) tüm döküm alaşımları arasında en yüksek dayanım ve sertliklere sahiptir. Bu faktör bazı uygulamalarda kullanımlarını mümkün kılar. 222.0, 224.0, 238.0, 240.0, 242.0 ve 243.0 alaşımları, bazıları %2 Mg'ye kadar (240.0, alaşımda %6) daha yüksek bakır içeriğine ve manganez, nikel, vanadyum ve/veya zirkonyum ilavelerine sahip olup, esas olarak yüksek sıcaklıklarda kullanılır. En yüksek mukavemet ve sünekliğin sağlanabilmesi için 2xx.x alaşımlarına ısıtma işlemi uygulanması gereklidir. Stres-korozyon çatlamasına karşı yüksek direnç sağlamak için uygun şekilde bu prosesler dizayn edilmelidir. Bu alaşımların genel korozyon direnci, diğer döküm alaşım

türlerinden daha düşüktür ve kritik uygulamalarda yüzey kaplamaları ile koruma gereklidir. [11]

-3XX.X Serisi

Silisyuma ek olarak magnezyum, bakır veya her ikisini ve özel durumlarda ek olarak nikel veya berilyum ilaveleri içeren alaşımlar 3xx.x grubunu oluşturur. Genel olarak; Al-Si-Mg, Al-Si-Cu veya Al-SiCu-Mg gruplarına girerler. Silisyum içeriği %5 ile %22 arasında değişmektedir. Bakır içeriği %0 (356.0 ve 361.0) ile maksimum %4.5 arasında değişir. Bu alaşımların çoğu, yüksek mukavemetli bileşimler için %0.3 ila ~%0.6 arasında değişen nominal magnezyum içeriğine sahiptir. 332.0 ve 336.0 piston alaşımları için %1.0 magnezyuma sahiptir. Düşük magnezyum içeriği (maksimum %0.10) gerektiren bu grubun başlıca alaşımları, 380.0 ila 384.0 basınçlı döküm bileşimleridir. Hem bakır hem de magnezyum, artan katı-çözelti sertleştirme yoluyla “döküldüğü gibi” (F) temperde mukavemeti ve sertliği artırır. Yalnızca yapay yaşlandırma (T5 tipi temperler) veya tam çözündürme artı yapay yaşlandırma işlemleri (T6 veya T7 tipi temperler) ile çok daha büyük mukavemet artışları sağlanır. Bileşime bağlı olarak, çökeltme sertleşmesi Mg_2Si , Al_2Cu , Al_2CuMg veya bu fazların kombinasyonlarına dayanan çökelti yapılarının sonucudur. Hem bakır hem de magnezyum içeren alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda daha yüksek dayanıma sahiptir. Kalıcı kalıp ve pres döküm prosesleri ile döküm için daha yüksek silisyum içerikli alaşımlar tercih edilir. Termal genleşme katsayısı, artan silisyum ve nikel içeriği ile azalır. Düşük genleşme katsayısı, pistonlar ve silindir blokları gibi motor uygulamaları için faydalıdır. 390.0 ila 393.0 alaşımlarında olduğu gibi silisyum içeriği %12'yi aştığında, birincil silisyum kristalleri mevcuttur, ince ve iyi dağılmışsa aşınma direncini artırır.

-4XX.X Serisi

Yüksek derecede bükülebilirliğe sahip olan bu alaşımlar karmaşık döküm sistemleri için uygundur. Isıl işleme tabi olamazlar ve maksimum çekme dayanımları 120-175 MPa aralığındadır. B413.0 alaşımı ötektik kompozisyon ve düşük ergime sıcaklığından dolayı dökülebilme kabiliyeti yüksek olmakla birlikte

kaynaklanabilme özelliğine sahiptir. Aynı zamanda orta ölçekte dayanıma sahip olan bu alaşımlar kopma olmadan önce yüksek uzama gösterirler. Korozyon dirençleri yüksektir. [14]

Bu alaşımlar genel olarak bilgisayar kasalarında ve mimari yapılarda kullanılmaktadır.

-5XX.X Serisi

5xx.x grubundaki alüminyum-magnezyum alaşımları, esasen orta ila yüksek mukavemet ve tokluk özelliklerine sahip tek fazlı ikili alaşımlardır. Al-Mg alaşımlarından yapılan dökümlerin başlıca avantajı, özellikle deniz suyu ve deniz ortamlarına karşı yüksek korozyon direncidir. En iyi korozyon direnci, düşük safsızlık içeriği (hem katı hem de gaz halinde) gerektirir ve bu nedenle alaşımlar, yüksek kaliteli metallerden hazırlanmalı ve dökümhanede büyük özenle işlenmelidir. Bu alaşımlar kaynaklı montajlar için uygundur ve genellikle mimari ve diğer dekoratif veya bina ihtiyaçlarında kullanılır. Alüminyum-magnezyum alaşımları ayrıca iyi işlenebilirliğe ve anodize edildiğinde çekici bir görünüme sahiptir.

-7XX.X Serisi

7xx.x alüminyum-çinko-magnezyum alaşımları, iyi bitirme özellikleri, iyi genel korozyon direnci ve ısıt işlem olmaksızın doğal yaşlandırma yoluyla yüksek mukavemet geliştirme kabiliyeti kombinasyonları ile dikkat çekicidir.

-8XX.X Serisi

8xx.x grubunun alaşımları, sertlik için ~%6 Sn ve az miktarda bakır ve nikel içerir. Bu alaşımlar, dizel motorlar için biyel kolları ve karter yatakları gibi yatak uygulamaları (kalay yağlama sağlar) için geliştirilmiştir.

2.4 Birincil Alüminyum Üretimi

Alüminyum, 20. yüzyılın sonları ve 21. yüzyılın başlarını kapsayacak bir sürede önemli artış göstermiş ve günümüzdeki en önemli metaller arasındaki yerini almıştır. Alüminyum üretimi iki kademede incelenebilir.

Alüminyum bileşikleri yer kürenin %8.23'ünü oluşturmaktadır. Bu oran alüminyumu doğada en çok bulunan üçüncü element yapmaktadır.

Oksijene karşı olan yüksek afinitesinden dolayı doğada saf halde bulunamaz. Bunun yerine alüminyum bileşikleri doğada oksitli bir yapıda ve belli başlı empüriteler içeren bir şekilde bulunmaktadır.

Bu nedenle alüminyumun eldesi boksit isimli cevher ile gerçekleştirilir. Boksit yeryüzünde fazlasıyla geniş bir çevrede bulunmaktadır. Avustralya, Jamaika, Gine, Çin ve Rusya boksit cevherleri açısından zengin ülkelerden sayılabilirler.

Boksitin üç önemli minerali vardır. Bunlar;

- Böhmit
- Hidraglit
- Diasporit'tir.

Boksit'ten metalik alüminyum eldesinde iki önemli proses bulunmaktadır. Bunlar Bayer ve Hall-Herault prosesleridir. Bayer prosesinde boksitten alümina elde edilir. Ardından Hall-Herault prosesinde ise alüminadan primer(birincil) alüminyum elde edilir. [15]

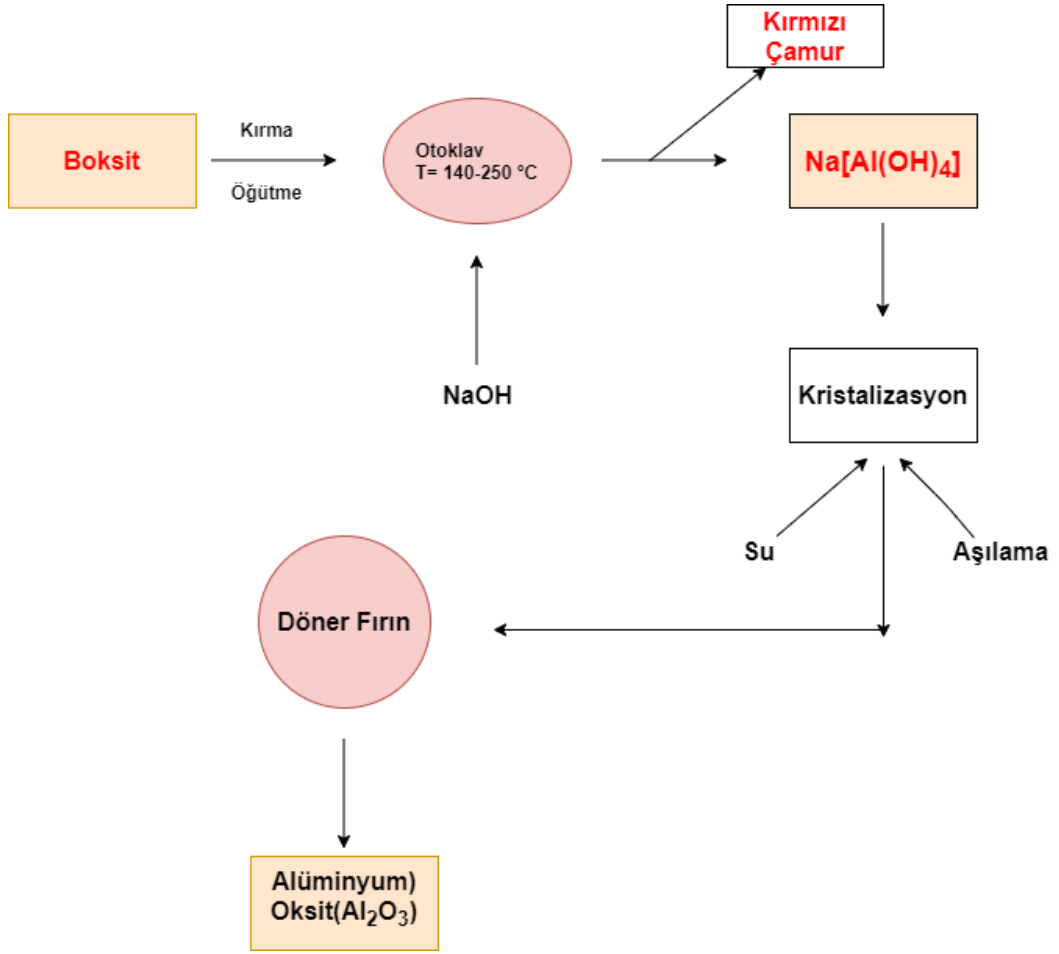
2.4.1 Bayer Prosesi

21. yüzyılda alüminyum oksidin(alumina) üretimindeki en önemli ve en yüksek tonajlı prosesidir. Kendi içinde farklı prosesler barındırsa da boksit cevherinden alüminyum oksit üretimi üç aşamada tamamlanır.

Bunlar;

- Boksit cevherlerinin liçi ve kırmızı çamurun ayrıştırılması
- Alüminyum hidroksitin çöktürülmesi
- Alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ eldesidir.

Şekil 2.2'de boksit cevherinden Bayer prosesi ile alümina üretiminin genel akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.2 Bayer Prosesi üretim akış şeması.

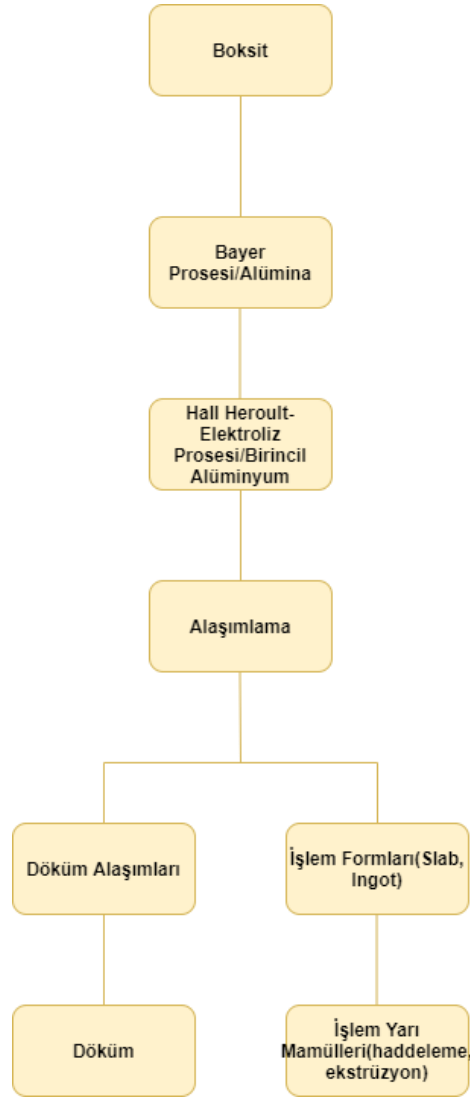
Bayer prosesi, kostik sodyum alüminat çözeltilerinden gipsit mineral polimorfu olarak alüminyum hidroksit kristallerinin çökertilmesine dayanır. Bayer işleminin kimyasal temeli aşağıdaki tersinir kimyasal denklemde özetlenebilir:



Bayer prosesinde öncelikle boksit ince bir morfolojiye gelecek duruma kadar öğütülür. Öğütme adımından sonra otoklav adı verilen yüksek basınçlı ve NaOH içeren tanklara alınır. Otoklav tanklarında, yapılan liç işlemi boksit içerisinde bulunan alüminyum oksitin çözülerek diğer oksitlerden ayrılması için kullanılmaktadır. Burada çökelen fazlardan birisi de demir oksit diye de adlandırılan

hematittir. Bu çöken malzemenin rengi kırmızı olduğundan kırmızı çamur denir. [16]

Elde edilen sodyum alüminat çözeltisi soğumadan sonra yıkanır. Yıkama işleminden sonra aşılama diye adlandırılan adıma geçilir. Burada katı kristal alüminyumhidrat ile aşılır. Filtrasyon aşamasından geçen alüminahidrat katıları, alüminanın eldesi için klasinasyon işlemine gönderilir. Kalsinasyon işlemi döner fırınlarda ve yaklaşık 1200-1300 °C derece sıcaklıkta gerçekleştirilir. Kalsinasyonda hedeflenen; alüminaya bağlı hidrat yapısını uzaklaştırmaktır. Kalsinasyondan sonra elde edilen alumina, birincil alüminyum üretiminde kullanılmak üzere elektroliz işlemine alınır. [17]Şekil 2.3'te boksit cevherinden alüminyum son mamüllere akış şeması gösterilmiştir.



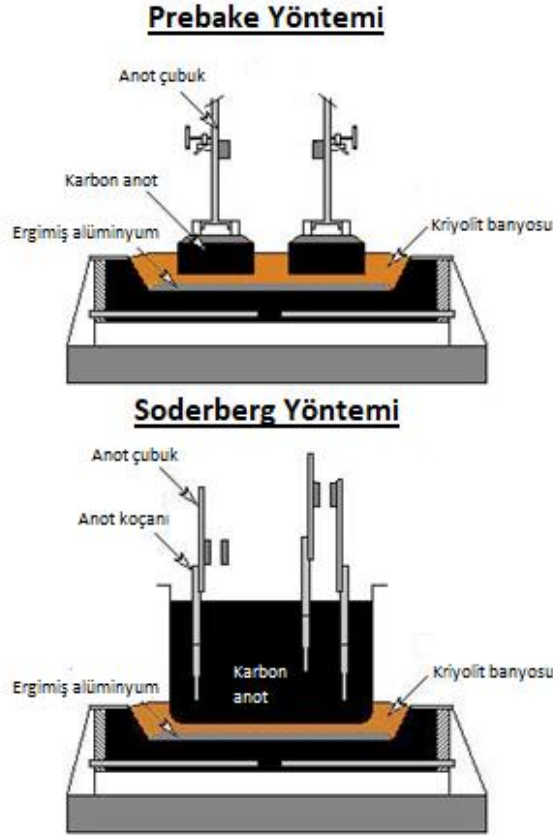
Şekil 2.3 Boksitten alüminyuma üretim akış şeması

2.4.2 Hall-Heroult Prosesi

Bayer Prosesi'nden alümina üretiminden sonraki aşama, alüminanın ergimiş kriyolit çözeltisi içerisinde metalik alüminyuma dönüştürülmesi işlemidir. Alüminanın elektroliz hücrelerinde yüksek akım değerlerinde(100-400 kA) altında 960-970 °C sıcaklıkta, elektrolit adı verilen kriyolit-alüminyum florür ergimiş tuz eriyiği içerisinde çözünmesi, ayrışması ve indirgenmesi sonucunda tabanda birincil alüminyum birikir. Biriken sıvı alüminyum kapalı vakum potalarıyla çekilip, alaşımlandırma ve dökümü yapılmak üzere dökümhane birimine gönderilir.

Geometrik olarak tipleri ve boyutları her tesise göre farklılık gösteren elektroliz hücrelerinin her biri bağımsız üretim birimi olup birbirlerine seri olarak

bağlanmaktadırlar. Endüstriyel hücre anotları ikiye ayrılmaktadır. Koklaşma durumunun hücre üzerinde olduğu sürekli anot tipli Soderberg ve koklaşmanın başka bir medya üzerinde gerçekleştiği kesikli anot tipli hücreler Prebake olarak isimlendirilmektedirler.



Şekil 2.4 Soderberg ve Prebake elektroliz hücre sistemleri.

Prebaked anotlu sistemler, rakamları 12-20 arası değişen dikdörtgen prizması benzer biçimde olan ve anot hattında hazırlanan, önceden pişirilmiş petrol koku ve taş kömürü zifti karışımının üst ortasındaki alt bölümü çelik pimlerle tutturulup, alüminyumdan oluşan pimin üst parçası ile anot çerçevesine bağlanmasından oluşur.

Prebaked sistemlerde kabuk kırma, hammadde şarjı ve anot tesiri giderme işlemleri otomatikman yapılmasına karşın, Soderberg sistemlerde bu işlemler çoğu zaman hususi araçlar vesilesiyle manuel olarak yapılmaktadır. Öte taraftan Prebake sistemlerde tam kontrollü operasyon nedeniyle, Soderberg'e göre, başta enerji olmak suretiyle bütün ünite girdi tüketimleri çok düşük, üretilen metal nitelik evsafi

da daha yüksektir. [18] Şekil 2.4'te Soderberg ve Prebake elektroliz hücrelerinin şekilsel gösterimi verilmiştir.

Sürekli olarak alüminyum levha eldesi genellikle, DC (doğrudan soğutmalı) döküm veya sürekli levha dökümü şeklinde gerçekleştirilir. Türkiye’de DC döküm ile başlayan alüminyum yassı mamül üretimi bulunmamaktadır. Bunun nedeni DC dökümden elde edilen slab malzemenin sonrasında sıcak haddeleme prosesine alınması gerekliliğidir. Türkiye’de alüminyum sıcak haddelemesi yapan bir işletme bulunmamaktadır. Döküm sürekli olarak; ikiz merdaneli döküm ile yapılır. İkiz merdaneli dökümde; levha bobbin şeklinde sarılır, DC döküm sonrasındaki sıcak haddeleme prosesine ihtiyaç duyulmaz. Dökülmüş bobin, daha sonrasında soğuk haddelenerek ve gerekli tavlama işlemleri uygulanarak istenilen kalınlık ve mekanik özelliklerde üretimi gerçekleştirilir.

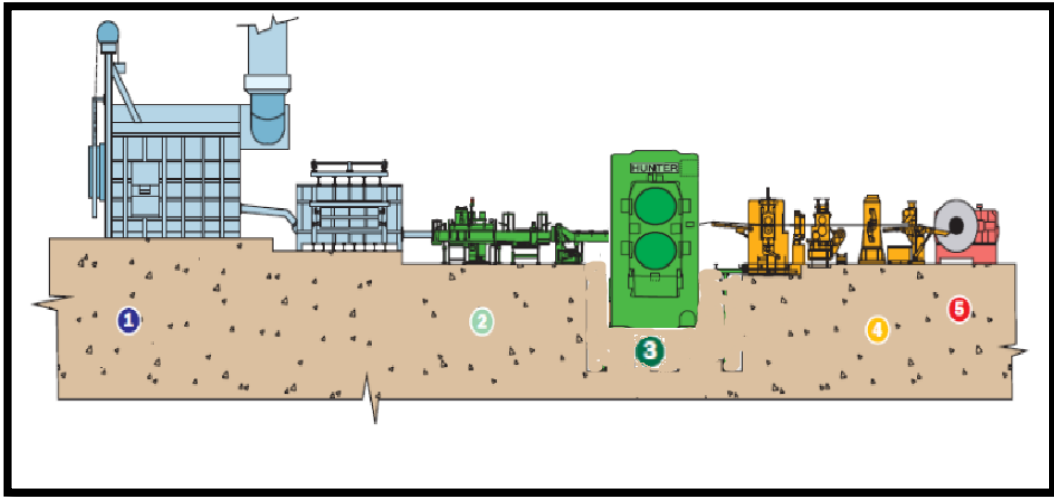
3.1 İkiz Merdaneli Döküm Yöntemi

Alüminyum benzeri metallerin sürekli olarak dökümü yaygın bir şekilde ikiz merdaneli döküm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemin; iyi yüzey kalitesi, ilave sıcak hadde prosesine ihtiyaç olmayışı ve nihai ürüne yakın malzeme üretilmesi gibi faydalarının yanında belli başlı dezavantajları da bulunmaktadır. İkiz merdane yönteminde enerji ve üretim maliyetleri dramatik şekilde azalır. Düşük verim oranları ve sınırlı dökülebilir alaşım skalası ise dezavantajları arasındadır. [19]

İkiz merdaneli döküm yönteminde; katılma ve deformasyon biraradadır. Bu yöntemde, ergimiş olan sıvı metalin iki adet birbirine ters yönde dönen ve sürekli olarak su ile soğutulan merdaneler arasına transferi yapılır. Katılma sıvı metal ile merdanelerin teması anında başlar. Metal merdanelerin arasından geçtikçe katılmış metal kalınlığı azalır.[20] Şekil 3.1’de yönteme ait şekilsel gösterim bulunmaktadır. Döküm sisteminin bölümleri şekilde gösterildiği halde madde madde ele alınacak olursa;

1. Ergitme ve tutma fırını
2. Gaz giderme ünitesi, tane inceltici besleme ünitesi, seramik filtre, derin yatak filtresi ve tandiş
3. Döküm makinesi(merdaneler ve seramik tip), grafit spreyleme ünitesi
4. Levha kesme makası
5. Bobin sarma ünitesi.

şekilde gösterilebilir.



şekil 3.1 İkiz merdaneli döküm yönteminin şekilsel gösterimi ve döküm sisteminin bölümleri.

İkiz merdane yönteminde; ingot, slablar, hurda ve alaşımlandırma alyajlarıyla şarj hazırlanıp ergitme fırınında ergime işlemi gerçekleştirilir. Tam olarak ergimiş olan metal, tutma fırınına seramik yolluklar (kanallar) vasıtasıyla transfer edilir. Bu fırında istenilen alaşıma göre gerekli alaşımlandırma şarjları, flaks ilaveleri ve karıştırma işlemi yapılır. Tutma fırınından yolluklara iletilen sıvı metal içerisindeki süreksizliklerin giderilebilmesi için ilk olarak gaz giderme işlemi yapılır. Gaz giderme ünitesinden çıkan sıvı metal, yolluklar vasıtasıyla filtreler kısmına gelir. Burada seramik köpük filtrelerin içerisinde geçerek, metal ve metal dışı inklüzyonlar süzölür. Seramik filtre yüzeyinde bir kek tabakası oluşarak 30 μm 'den büyük parçalar yakalanır. Rafine edilmiş sıvı metal, refrakter yolluklar vasıtasıyla tandiş kısmına gelir. Tandiş içerisinde sıvı metal seviyesi kontrolü yapılarak tip aracılığıyla döküm merdanelerine iletilir. şekil 3.2'de seramik tip ve döküm merdaneleri arasında gerçekteşen katılaşma gösterilmiştir. Döküm merdaneleri

Tablo 3.1 İkiz merdaneli döküm yöntemiyle üretilebilen bazı alaşımlar.

1050	1060	1100	1145	1188	1190	1193	1199
1200	1230	1235	1345				
3003	3004	3005	3006	3105			
5005	5010	5034	5050	5052	5056		
5083	5085	5086	5154	5182	5252	5254	5356
5454	5456	5457	5652	5657			
6063							
7072							
8010	8011	8111	8014				



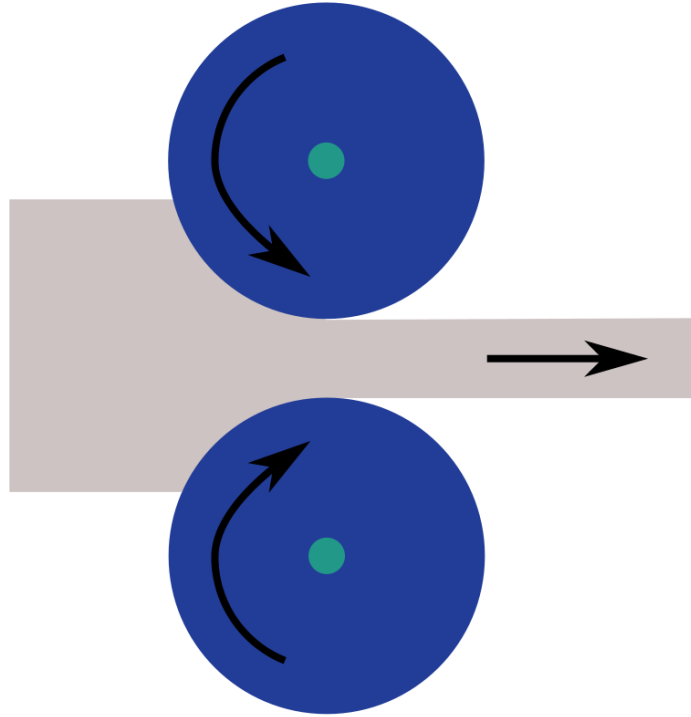
Şekil 3.3 İkiz merdaneli döküm sonrası bobin şeklinde sarılmış alüminyum rulo.

3.2 Soğuk Haddeleme

Haddeleme; birbirine ters yönde dönen 2 adet üstüste konumlandırılmış merdanelerin arasından malzemenin geçirilerek inceltilmesi işlemidir. Malzemenin nihai mekanik özelliklerini kazanmasında haddelenenin önemli bir payı bulunmaktadır. Yassı sac üretiminde tek sertleştirme yöntemi haddelemedir.

Haddeleme işlemlerinden sonra belirlenen kalınlıklarda gerekli tav işlemleri yapılarak malzemeye nihai arzulanan özellikler kazandırılır. Şekillendirilebilirlik ve mukavemet gibi kritik özellikler bu proseslerin optimizasyonu ile ayarlanır.

Şekil 3.4'te soğuk haddeleme işleminin basitçe şematik gösterimine yer verilmiştir. Birbirine ters yönde dönen merdaneler, üstüne uygulanan kuvvetlerle giriş sac malzemesini inceltir. Bu inceltme durumu merdanelere uygulanan kuvvetlerle doğru orantılıdır. Bir kalınlıktan daha düşük bir kalınlığa haddelenen malzemenin deformasyonu % ezme oranı olarak adlandırılmaktadır. [21]



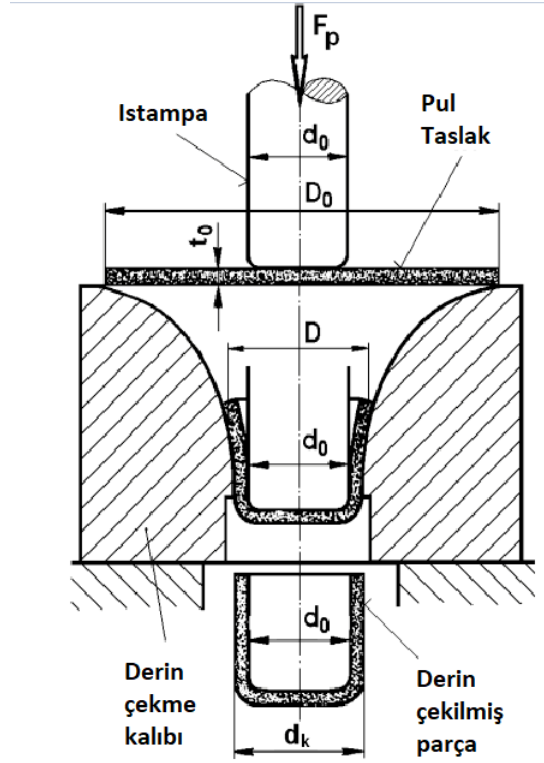
Şekil 3.4 Soğuk haddelenenin şematik gösterimi.

3.3 Tavlama Isıl İşlemleri

Yassı mamül alüminyum üretiminde; çoğu zaman tavlama ısı işlemi kullanılmaktadır. Tavlama termomekanik proseslerde birkaç amaca hizmet eder. Döküm yapısındaki heterojen segregasyon olmuş yapıyı dağıtıp homojen bir yapı elde etmek için homojenizasyon tavlama uygulanmaktadır. Yeniden kristallenme tavlama ise; haddelenmiş tekstürü yeniden kristalize etmek maksadıyla uygulanır. H0 nihai kondisyonlu malzemelerde nihai yeniden kristallenme tavlama bir zorunluluktur. Ara tav ise çoğu zaman haddelemeye devam edebilmek için yapılan bir tavlama. Nihai kondisyona göre ara tavda tam ya da kısmi yeniden kristalleşme tavlama uygulanabilir. Ara tav ayrıca anizotropik özellikleri optimize etmede önem teşkil etmektedir.

4 DERİN ÇEKME İŞLEMİ

Sac şekillendirme; endüstriyel parça üretimi, ofis ve ev aletleri, otomobil, havacılık gibi farklı sektörlerde kullanılan en önemli üretim yöntemlerinden biridir. Derin çekme ise sac şekillendirmede sıklıkla uygulanan yöntemlerden biridir. Derin çekme işlemi, düz metal levhaların büyük miktarda plastik deformasyonu yoluyla belirli şekillerde mühendislik parçalarının üretilmesine dayanır. Bu plastik deformasyonu bir metal levhaya dışarıdan bir kuvvet uygular. Bu dış kuvvet, malzemeyi plastik bölgeye yerleştirecek ve dış kuvvetin yerini değiştirdikten sonra metal parçanın tekrar geri esnememesini veya elastik olarak deforme olmamasını sağlayacak kadar büyük olmalıdır. Bu işlemle üretilen parçaların nihai kalitesi, nihai duvar kalınlığına ve kırışksız ve kırılmaz olmasına bağlıdır. [22]



Şekil 4.1 Derin çekme işleminin şematik gösterimi

Kupa çekme veya derin çekme, yaygın olarak kullanılan sac şekillendirme işlemlerinden biridir. Bu işlemde, pul taslak olarak adlandırılan bir sac metal bir kalıp boşluğuna yerleştirilir, bir tutma plakası veya tutma halkası kullanılarak yerinde tutulur ve rijit bir zımba kullanılarak kalıp boşluğuna bastırılır. Sac metal düz tabanlı kalıp boşluğunun şeklini alır. Sacın kesilmesini önlemek için hem kalıp hem de zımba köşe yarıçapı ile sağlanmalıdır. Sacın kalıba çekilmesi sırasında sacda %12'ye varan kalınlaşma olur. Bu nedenle ıstampa ile kalıp arasında boşluk sağlanır. Radyal boşluk, bu nedenle, sac kalınlığı artı sacın kalınlaşmasına eşittir. Istamp, tabakanın altını kalıp boşluğuna iter. Tutma plakasının altındaki sacın düz kısmı, kalıp eksenine doğru hareket eder, ardından kalıp profili üzerinde bükülür. Kalıp profili üzerinde büküldükten sonra, levha yan duvar boyunca aşağı doğru akarak bükülür. Levhanın dikey kısmı daha sonra kalıp yüzeyini geçer. Kalıp duvarına akan metali değiştirmek için kalıbın merkezine doğru daha fazla metal çekilir. Tutma plakası ile boşluk arasındaki ve kalıp ile boşluk arasındaki sürtünme, yatay akışı sırasında boşluk tarafından üstesinden gelinmelidir. Derin çekme işlemi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. [23] Şekil 4.2'de ise derin çekme ile üretilmiş bazı ürünler gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Derin çekme ile üretilmiş bazı ürünler.

4.1 Proses Etki Eden Parametreler

4.1.1 Malzeme

Derin çekme uygulamasında kullanılacak olan sac metalin, kalın olması çekilebilme sınırını arttırmaktadır. Bu durumdan kaynaklı olarak malzemenin incelemesine daha çok imkan tanınır. Malzemenin tane yapısının daha ince formda olması, az miktarda faz içermesi ve intermetalik türü segregasyon olmuş kalıntılardan yoksunluğu derin çekilebilme kabiliyetine olumlu etki sağlar.

Malzemenin derin çekme öncesi; akma mukavemeti ve sertliği derin çekme kabiliyeti açısından ölçü kabul edilemez. Yumuşak metal olması durumun derin çekilebilmeye gözle görülür bir etkisi yoktur. Çelik alüminyum göre daha sert olmasına rağmen derin çekilebilme kabiliyeti daha yüksektir. [24]

Deformasyon hızı (m) ve deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerlerinin yüksek olması derin çekme işlemini bir nebze olumlu etkiler fakat bu etki major statüde değildir.

Derin çekmeyi etkileyen önemli faktörlerden olan dikey anizotropi (R) katsayısıdır. Bu katsayı malzemenin kristal yönelmesi, haddeleme ve tavlama bünyesinde barındıran termomekanik işlemlere bağlıdır. Bu katsayı bu değişkenlerin optimizasyonu ile kontrol edilir.

Mühendislikte malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan en yaygın yöntem çekme testidir. Çekme testi ile yaygınca bilinen mukavemet değerleri dışında, sünekliğin ölçüsü olan yüzde uzama miktarı, deformasyon serleşmesi üssü(n), deformasyon hızı duyarlılığı üssü(m), dikey ve düzlemsel olmak üzere anizotropi katsayısı gibi ölçütler de belirlenebilmektedir. [25]

Çekme testinden elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti, yüzde uzama gibi değerler derin çekme işleminde malzemenin nihai formunu tahmin etmekte yeterli verileri oluşturmazlar. Uzama değerleri her ne kadar malzemenin şekillendirilebileceği hakkında ipucu verse de, tek eksenli yapılan çekme testi sonuçlarında bu bilgiler yeterli olmayacaktır.

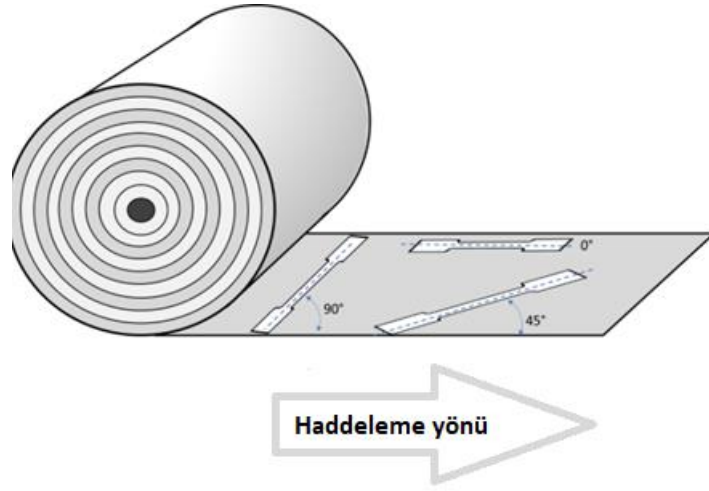
Malzemelerin derin çekme davranışıyla ilgili daha nitelikli yorumlar yapabilmek için; Erichsen çökertme testine başvurulur. Bu testte; belirli bir çapta küresel uçlu bir ıstampa vasıtasıyla metal çökertilir. Tepecik şeklinde çökertilmiş yapı gözlemlenir ve ayrıca çatlak da mevcuttur. Malzemenin yırtılma anındaki ulaştığı tepecik yüksekliği Erichsen değerini ifade eder. Şekil 4.3'te Erichsen çökertme testinin taslağı gösterilmiştir. Şekil 4.4'te ise çökertme sonrası numunenin son durumu görülebilir.



Şekil 4.3 Erichsen çökertme testi düzeneği.



Şekil 4.4 Erichsen çökertme testi sonrası yırtılmış numune.



Şekil 4.5 Bir sac malzemedeki hadde yönüne göre mekanik test numuneleri.

Anizotropik özellikler hakkında daha değerli yorumlar yapabilmek için malzemeye sadece bir yönden değil üç yönden de çekme testleri yapılır. Bu yönler hadde yönüne paralel yani 0° derece, 45° derece ve 90° derecedir. Bu yönler Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Anizotropi değeri malzemenin şekil alma yeteneğinin önceden tahmin edilmesinde kullanılır. Çekme testlerinde enine doğrultuda gerçek şekil değiştirme (ϵ_w) ve kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme kullanılarak (ϵ_t)

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (4.1)$$

Bağıntısı ile r değeri adı verilen dikey anizotropi katsayısına ulaşılır.

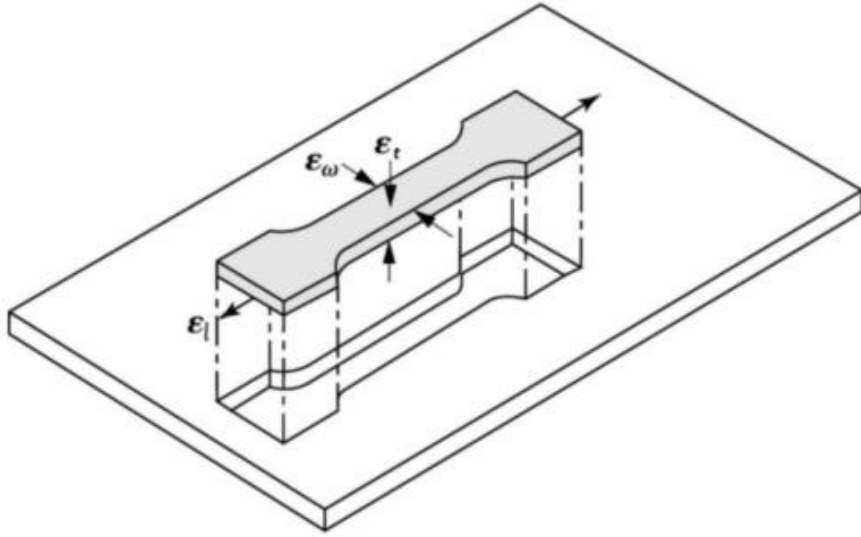
Çekme deneyinden önce ve sonra test numunesinin eni w_0 ve w , kalınlığı ise t_0 ve t olarak(Şekil 4.6) kabul edilirse;

$$\epsilon_w = \ln \left(\frac{w}{w_0} \right) \quad (4.2)$$

$$\epsilon_t = \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (4.3)$$

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \ln \left(\frac{w}{w_0} \right) / \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (4.4)$$

bağıntısı ile hesaplanır.



Şekil 4.6 Çekme numunesinde birim şekil değiştirmeler.

Dikey anizotropi($\bar{R}$) değeri pozitif bir sayıdır. $R>1$ olduğu zaman, malzemenin sac düzlemindeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dirençli olduğu şeklindedir. Bu durumun karşıt olduğu koşulda $R<1$ 'dir. Tamamen izotrop özellik gösteren bir malzemede ise $R=1$ 'dir.

Düzlemsel anizotropi(ΔR) ise derin çekilmiş kaplarda kulaklanma davranışına sebebiyet verir.

Üç yönlü çekme testlerinden elde edilen r değerleri ile dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi değerleri hesaplanır.

Ortalama dikey anizotropi;

$$\bar{R} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (4.5)$$

Eşitliği ile hesaplanır.

Düzlemsel anizotropi ise;

$$\Delta R = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (4.6)$$

Eşitliğiyle ifade edilir. [26] [27]

4.1.2 Kalıp geometrisinin etkisi

Derin çekme işlemi sırasında derin çekilebilme kabiliyetini etkileyen kalıpla ilgili parametreler; matris kenar yarıçapı (r_m), ıstampa kenar yarıçapı (r_{st}) ve zımba ile kalıp arasındaki boşluk (c) mesafesidir. Sacın kalıp ile ilk teması ettiği yer matris kenar yarıçapıdır ve malzemenin çekilebilmesinde önemli rol oynar. Bu değer malzemenin rahat bir şekilde kayabileceği miktarda olmalıdır. Ayrıca r_m değerinin artması ile derin çekmede uygulanması gereken kuvvet azalır ve derin çekme oranı artar. Yalnız, bu değer sınırsız olarak arttırılamaz. Bu değer çok fazla olması durumunda ıstampanın etki alanı azalır ve sacın çevresi ile nihai çıktı ürünün yan duvarlarında kırışıklık sonucu hasar görülür. İyi bir derin çekme operasyonu sağlayabilmek için çekme kenarının yuvarlatılmasının büyük etkisi vardır.

4.1.3 İşlem koşulları

Derin çekme prosesinde; iş parçası olarak kullanılacak olan sacın bazı bölgelerinin yağlanması uygun yağ seçilmemesi ve yağlama miktarının yetersiz olması yüksek sürtünme kuvvetlerinin ortaya çıkmasına sebebiyet verir. Çoğu zaman, yağlama yetersizliğinden kaynaklı parça tabana yakın kısımlardan yırtılır. Uygun ve yeterli miktarda yağ kullanımı; parçanın maruz kalacağı sürtünme kuvvetlerini azaltır. Aynı zamanda derin çekme oranını da arttırır. İş parçası sacın matris ile temas eden yüzeyleri yağlanmalıdır. ıstampa tabanı ile temas eden yüzeyin yağlanması olumsuz etki barındırır. ıstampa tabanının iç yüzeyi ile malzemenin taban bölgesinde oluşan sürtünmeler derin çekme kabiliyetine olumlu etki yapar. Bazı durumlarda ıstampanın yüzeyi bir miktar pürüzlendirilir.

ıstampanın uygulayacağı basınç ve hızının uygun seçilmesi derin çekme işlemini olumlu şekilde etkiler. Basınç ve hız haddinden fazla uygulanmışsa malzeme derin çekme işlemini tamamlayamadan yırtılır.

4.2 Derin çekme işlemindeki yaygın hatalar

4.2.1 Kırışma

Derin çekilmiş ürünlerde en çok karşılaşılan kusurlardan biri kırışmadır. Basma gerilimine tam olarak dirayet gösteremeyen malzemede bu oluşan gerilimi minimize etmek için kırışıklık durumu vuku bulur. Malzemenin flanş kısmında veya duvarla temas halinde olan bölgelerde kırışıklık gözlenir. Flanş tarafında oluşan kırışıklıklar, tutucu kuvvetlerin optimizasyonu ile önlenir. Fakat, malzemenin kenar bölgelerinde meydana gelen kırışıklıkları engellemek için bifürkasyon adı verilen bir metod kullanılır. Bu metoda göre; toplam kırışma enerjisi eğme enerjisinin burulma enerjisinin, gerilme enerjisinin ve düzlemsel gerilim tarafından yapılan işin toplamına eşittir. Yüksek kalıp tutma kuvveti her zaman kırışıklığı engellemek için kullanılan etkin bir yöntemdir fakat minimum kuvvetle proses gerçekleştirme eğilimi de her zaman mevcuttur. Kalıp tutma kuvveti dışında; sürtünmeyi azaltarak, geniş radiüse sahip ıstampa kullanarak ve derin çekme derinliğini azaltmak da kırışıklık oluşumunun önüne geçilebilir. [28] Şekil 4.7’de kırışma gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Derin çekme işlemi sonrası oluşan kırışma.

4.2.2 Portakal kabuğu

Malzemelerin aşırı deformasyona bağlı olarak yüzeyde meydana gelen kabarıklıklara portakal kabuğu oluşumu denmektedir. Portakal kabuğu oluşumunun en önemli sebebi sac yüzeyinde bulunan iri tanelerdir. Haddemele işleminde malzemenin kesit ortasındaki taneler daha birbirine bağımlı sistematik

bir şekilde deforme olurlarken, yüzeydeki kaba taneler birbirinden bağımsız şekillerde deforme olmaktadır. Bu durumun tezahürü olarak portakallanma durumu ortaya çıkar. Şekil 4.8’de yüzeyde oluşmuş portakal kabuğu durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Derin çekme işlemi sonrası yüzeyde oluşan portakal kabuğu durumu.

4.2.3 Çatlamlar

Derin çekme işlemi gören malzemelerin çoğunlukla ıstampa eğrilik yarıçapının üzerinde kalan kısımda çatlama görülmektedir. Malzemenin mekanik özelliklerinin yeterli olmaması, ıstampa yarıçapının küçük olması, ıstampa ve kalıp arasındaki mesafenin yeterli olmaması sac malzemede çatlaklara sebep olabilmektedir. Asıl olarak malzemenin çatlamasına sebep olan durum ıstampa uygulama kuvvetinin artmasıdır. Bu nedenle derin çekme esnasında oluşabilecek çatlamları engellemek için ıstampa kuvvetini azaltmak veya zımba kuvvetini dolaylı olarak etkileyen tüm parametrelerin gözden geçirilmesi gerekmektedir. [19]



Şekil 4.9 Derin çekme işlemi sonrası çatlama.

4.2.4 Kulaklanma

Derin çekme uygulamalarında en sık karşılaşılan ve öncelikli olarak kontrol altına alınması gereken sorun kulaklanmadır. Kulaklanma; derin çekilmiş ürünün ağız kısmında oluşan tepecik ve çukurcuk yapılaşmasıdır. Bu tepecik ve çukurcukların hepsi kulak olarak isimlendirilmektedir.

Derin çekme işlemi sonunda iki, dört, altı ve sekiz gibi değişik adetlerde kulak oluşumu gözlemlenebilse de en çok raslanan kulaklanma türü dörtlü kulaklanmadır. Kulakların haddeleme yönüne göre oluşum pozisyonlarına göre iki tip kulaklanmadan bahsedilir.

- a) $0^\circ / 90^\circ$ kulaklanma
- b) 45° kulaklanma

Kulaklanma oluşumun temel nedeni, sac malzemesinin sahip olduğu tekstürden kaynaklı olarak oluşan anizotropik karakteridir. Yassı mamül alüminyum üretim sürecinde dökümden sonra haddeleme ve tavlama gibi termomekanik proses adımları bulunur. Nihai yassı malzemede genellikle haddeleme/deformasyon ya da tavlama/rekristalizasyon tekstürü hakimdir. Malzeme yapısındaki tekstür ve baskınlığının miktarı anizotropi değerini, buna bağlı olarak da kulaklanmanın oluşacağı yönler ve şiddeti belirlenmektedir.

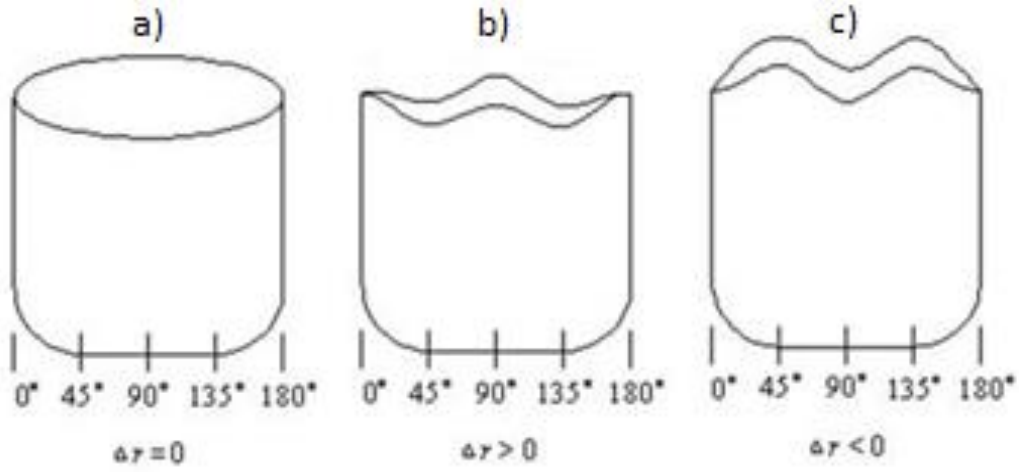
0° / 90° kulaklanmasında; derin çekme işlemi uygulanmış malzemede rekristalizasyon tekstürü hakimdir. Buna karşın 45° kulaklanmasında deformasyon tekstürünün hakimiyeti görülür. [29]

Üretim süreçlerinde; son işlem adımında oluşan mikroyapı ve tekstür bir sonraki proseste oluşabilecek yapıyı etkilemektedir. Bu nedenle son ürünlerdeki anizotropi miktarını minimum düzeye indirgeyebilmek için, üretimin başından sonundaki üretime kadar her prosesi denetim altına almak kuvvetle önemlidir. Öncel ve sonraki termomekanik işlemlerde anizotropinin birbirini sıfırlayacak şekilde dizayn edilmesi önemlidir.

Anizotropik özellikler nedeniyle iş malzemesinin belli yönlerde daha kolay belli yönlerde daha zor deforme olmasından kaynaklı oluşan kulaklanma; endüstriyel üretimde ikincil kulak giderme proseslerini de beraberinde getireceğinden maliyet ve üretim verimi açısından ciddi sorunlar yaratmaktadır. Hatta ve hatta, aşırı kulaklanma durumu iş malzemesini tamamen hurda statüsüne de getirebilir.

Alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirliğini n , m ve r değerleri doğrudan olarak etkiler. Yüksek deformasyon sertleşmesi üssü değeri, yüksek deformasyon hızı duyarlılığı üssü ve yüksek ortalama dikey anizotropi değerleri şekillendirme kabiliyetini artırırlar.

Soğuk haddeleme 45° yönlerinde kulak oluşumun destekler (artan deformasyon tekstürü). Soğuk işlem oranının arttırılmasıyla kulakların büyüklüğü de artar. Tavlama, 90° yönlerindeki kulaklanma eğilimini arttırır. Bunun nedeni; tavlama ile birlikte gelen rekristalizasyon durumudur.



Şekil 4.10 Hadde yönüne göre oluşan farklı kulaklanma durumları. a) kulaklanma yok, b) 0° ve 90° derece kulaklanması, c) 45° derece kulaklanması.

Kulaklanmanın oluşup oluşmayacağını derin çekme işlemi öncesinde tahmin etmek mümkündür. Üç yönlü mekanik testlerden elde edilen r değerleri kullanılarak düzlemsel anizotropi değerine ulaşılır. Düzlemsel anizotropi ΔR simgesiyle gösterilir. $\Delta R=0$ ise malzeme tam izotropik özellik göstererek kulaklanma davranışı ortaya çıkmaz. $\Delta R<0$ ise 45° yönlerinde kulaklanma gözlemlenir. $\Delta R>0$ olduğu durumda ise 0° ve 90° derece yönlerinde kulaklanma durumunun vuku bulacağı söylenir. Ayrıca düzlemsel anizotropi değerinin sıfırdan eksi veya artı yönde aldığı mutlak değer arttıkça kulaklanmanın şiddeti doğru orantılı bir biçimde artar. Şekil 4.10'da yönlerle göre oluşan kulaklanmalar gösterilmiştir. [30]

3005 serisi alüminyum alaşımından, magnezyum oranı iki farklı levha kullanılarak, farklı termomekanik prosesler ve magnezyum oranının değiştirilmesi ile derin çekilebilirliğe olan etki laboratuvar ortamında incelenmiştir. Deneylerin yürütülmesinde kullanılan ana teçhizatlar, laboratuvar ölçeğinde hadde makinesi ve tav fırınıdır. Karakterizasyon için ise; optik mikroskop, çekme testi cihazı, Erichsen çökertme testi cihazı, erichsen derin çekme cihazı ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

5.1 Teçhizat ve Malzeme

Deney süreçleri boyunca kullanılan teçhizat ve Malzeme listesi aşağıdaki tablo 5.1'deki gibidir.

Tablo 5.1 Deney süreçleri boyunca kullanılan teçhizat ve malzeme listesi.

Teçhizat/Malzeme
3005 Alaşım Levha(%0.4 Mg)
3005 Alaşım Levha(%0.6 Mg)
Laboratuvar Ölçekli Hadde Makinesi
Laboratuvar Tav Fırını(Nabertherm Marka)
Elektrolitik Dağlama Cihazı(Struers Marka)
Optik Mikroskop(ZEISS marka)
Çekme Testi Cihazı(Zwick/Roell Marka)
Taramalı Elektron Mikroskobu(ZEISS marka)
Erichsen Çökertme Testi Cihazı
Erichsen Derin Çekme Testi Cihazı
Stereo Mikroskop(ZEISS marka)

Deneyler kapsamında kullanılan 3005 alaşım levhalar ikiz merdaneli sürekli döküm yöntemiyle elde edilmiştir. İki farklı magnezyum oranına sahip 3005 alaşım alüminyum levhalar kullanılmıştır. 3005A olarak kodlanan alaşımdaki magnezyum oranı % 0.4 iken, 3005B olarak kodlanan alaşımdaki magnezyum oranı %0.6'dır. Ana alaşım elementi içerikleri aşağıdaki Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Deneysel süreçte kullanılan, magnezyum oranı farklılık gösteren iki 3005 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağı.)

<i>Alaşım</i>	<i>% Si</i>	<i>%Fe</i>	<i>% Cu</i>	<i>%Mn</i>	<i>%Mg</i>
3005A	0,3-0,6	0,4-0,7	0-0,3	1,2-1,4	0,4
3005B	0,3-0,6	0,4-0,7	0-0,3	1,2-1,4	0,6

5.2 Prosesler

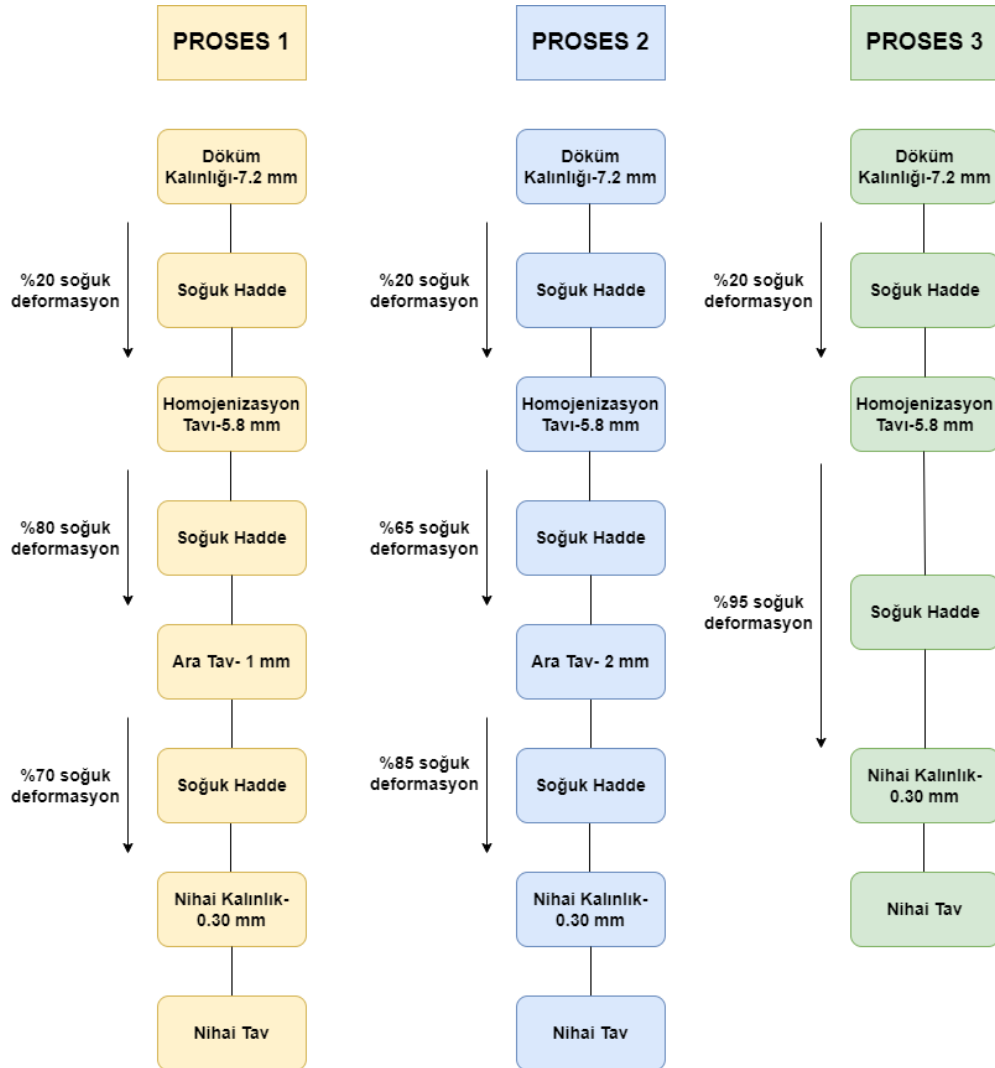
İkiz merdaneli döküm yöntemiyle üretilmiş levhalara,  farklı termomekanik proses rotası uygulanmıştır. Toplamda; magnezyum oranı değişik olan 2 farklı levhaya 6 proses uygulanmıştır. Prosesler; Proses 1, Proses 2 ve Proses 3 olarak adlandırılmıştır. 3005A levhası üzerinden yapılan prosesler; Proses A1, Proses A2 ve Proses A3 ismini alırken, 3005B levhası üzerinden yapılan prosesler; Proses B1, Proses B2 ve Proses B3 olarak kodlanmıştır.

Proses 1'de döküm kalınlığından itibaren Malzeme %20 deformasyon oranıyla 5,8 mm'e haddelenmiştir. Bu kalınlıkta malzemeye 500-580°C aralığında bir homojenizasyon tavlı işlemi uygulanmıştır. Ardından, levha %80 deformasyon oranıyla 1 mm'e haddelenmiştir. Bu kalınlıkta ise levha 420-460°C aralığında ara tava alınmıştır. Ara tavdan sonra levhaya %70 deformasyon oranı uygulanıp nihai ürün kalınlığı olan 0.30 mm'e haddelenmiştir. Son olarak malzemeye nihai kondisyon tavlı uygulanıp proses sonuçlandırılmıştır.

Proses 2'de döküm kalınlığından sonra levha %20 deformasyon oranıyla 5,8 mm'e haddelenmiştir. Bu kalınlıkta Proses 1'de olduğu gibi aynı sıcaklıkta

homojenizasyon tavı uygulanmıştır. Ardından, levha %65 deformasyon oranıyla 2 mm'e haddelenmiştir. Bu kalınlıkta aynı şekilde Proses 1'de olduğu gibi aynı sıcaklıkta ara tav uygulanmıştır. Sonrasında %85 deformasyon oranı uygulanarak nihai kalınlık olan 0,30 mm' haddelenmiştir. Bu kalınlıkta yine Proses 1'le aynı şekilde olarak eşit sıcaklıkta nihai kondisyon tavı yapılmıştır

Proses 3'te ise; döküm kalınlığında bulunan levha, %20 deformasyon oranıyla 5.8 mm'e haddelenmiştir. Proses 1 ve 2'de olduğu gibi homojenizasyon tavı koşulları bu proseste de aynıdır. İlk iki prosesten farklı olarak bu proseste ara tav işlemi uygulanmamıştır. Levha homojenizasyon tavından sonra direkt olarak nihai kalınlık olan 0,30 mm'e %95'lik soğuk deformasyon oranıyla haddelenmiştir. Bu prosesin nihai tav koşulları da ilk iki proseste olduğu gibi aynı şekilde 320-360°C aralığında uygulanmıştır. Her 3 prosesin de rotaları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Deneylerde uygulanan prosesler.

5.3 Karakterizasyon Çalışmaları

Proseslerden elde edilen ara kalınlıklardaki ve nihai kalınlıklardaki numuneler metalografik olarak hazırlanıp, polarize ışık ve BF(aydınlık alan) altında mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Struers marka numune zımparalama ve dağlama cihazında hazırlanan numuneler ZEISS marka optic mikroskop altında görüntülenmiştir.

Nihai proses numuneleri üzerinden üç yönlü çekme testleri(0, 45 ve 90° derece); Zwick/Roell marka çekme testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Her test sonucunda akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve anizotropi ile ilgili dikey-düzlemsel anizotropi değerleri elde edilmiştir.

Numunelerin derin çekilebilme mesafesini ölçen; Erichsen çökertme testi yine aynı isimli markaya sahip Erichsen çökertme cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu testten sonra elde edilen Erichsen değerleri kaydedilmiştir. Sonrasında ise numunelere ait yırtılma görüntüleri ZEISS marka stereo mikroskop altında görüntülenmiştir. Ayrıca yırtılma bölgelerinden ZEISS marka SEM cihazından morfolojik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Son olarak numunelerin derin çekilme sonrası kulaklanma durumunun, mekanik testlerdeki anizotropi verileriyle uyuşup uyuşmadığını görmek için Erichsen derin çekme testi uygulaması yapılmıştır. Her prosese ait numuneler üzerinden kulaklanma yüzdeleri ölçülmüş olup; nihai numunelerin fotoğrafları ve kulaklanma grafikleri verilmiştir.

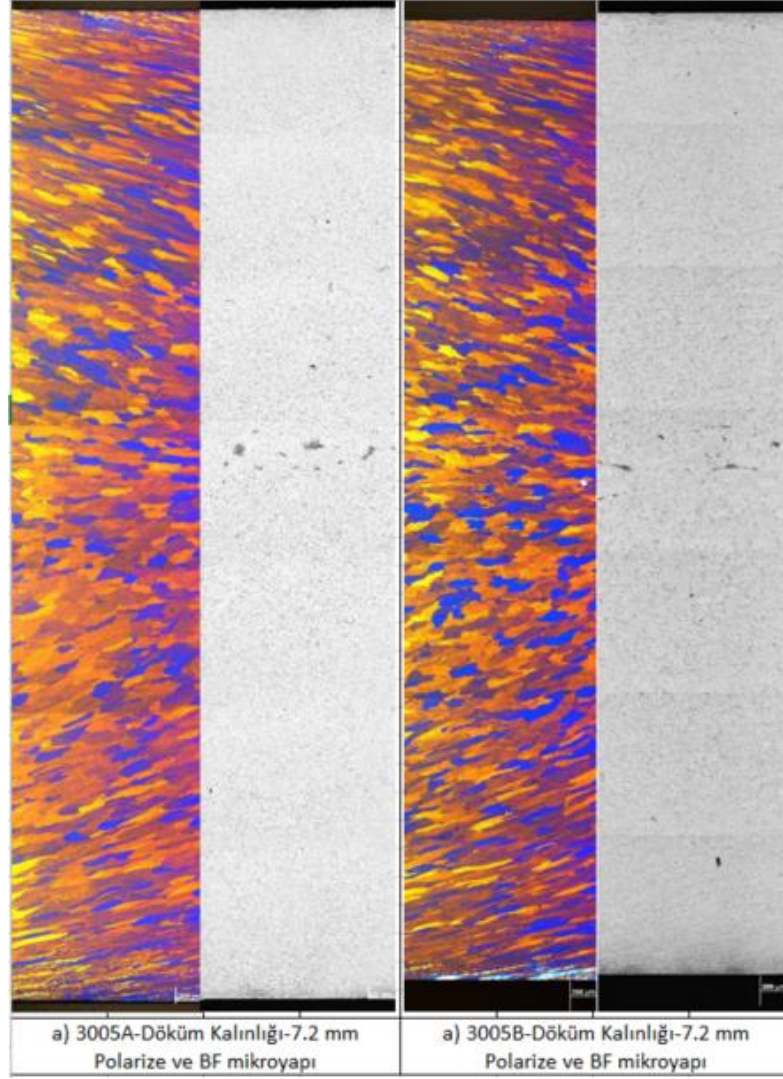
6.1 Mikroyapı İncelemeleri

İkiz merdaneli döküm yöntemi kullanılarak 3005 alaşımı levhaların dökümü yapılmıştır. Çalışmalar magnezyum oranı farklı iki levha üzerinden yürütülmüştür. Magnezyum oranı % 0,4 seviyesinde olan alaşım 3005A, %0,6 seviyesinde olan 3005B olarak kodlanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri döküm veya hadde yönüne paralel veya dik şekilde gerçekleştirilebilir. Döküm veya hadde yönüne dik incelemeler için longitudinal(L) yönü, paralel yönde incelemeleri için ise transverse(T) tabirleri kullanılır. Mikroyapı incelemeleri için kullanılan yönlerin gösterimi Şekil 6.1'teki gibidir.



Şekil 6.1 Mikroyapıları için döküm veya hadde yönüne göre hazırlanan numunelerin yönleri.



Şekil 6.2 3005A ve 3005B alaşım levhaların polarize ve BF ışık altında döküm mikroyapıları.

Şekil 6.2’de döküm polarize ışık altında mikroyapıları incelendiğinde, ikiz merdaneli dökümün doğasının getirdiği klasik efektler gözlemlenmiştir. Çok hızlı katılaşma oranları ile katılaşma gerçekleştiğinden dolayı mikroyapılarda yüzey tanelerinde aşırı incelme durumu görülmüştür. Ayrıca katılaşma iki merdanenin arasından geçerken sağlandığı için bir miktar haddeleme etkisine bağlı olarak özellikle yüzeye yakın tanelerin uzadığı görülmüştür. Yüzeydeki tanelerin aşırı doymuş olduğu söylenebilir. Merkeze yakın tanelerde ise; eş eksenlilik ve tane kabalaşmasının var olduğu görülmektedir. 3005B, 3005A’ya göre %0,2 oranında daha fazla magnezyum içerdiği için; tane yapısının bir miktar incelendiği gözlemi yapılmıştır. Bunun nedeni olarak magnezyumun çekirdeklenmeye yaptığı olumlu etki söylenebilir. Daha fazla

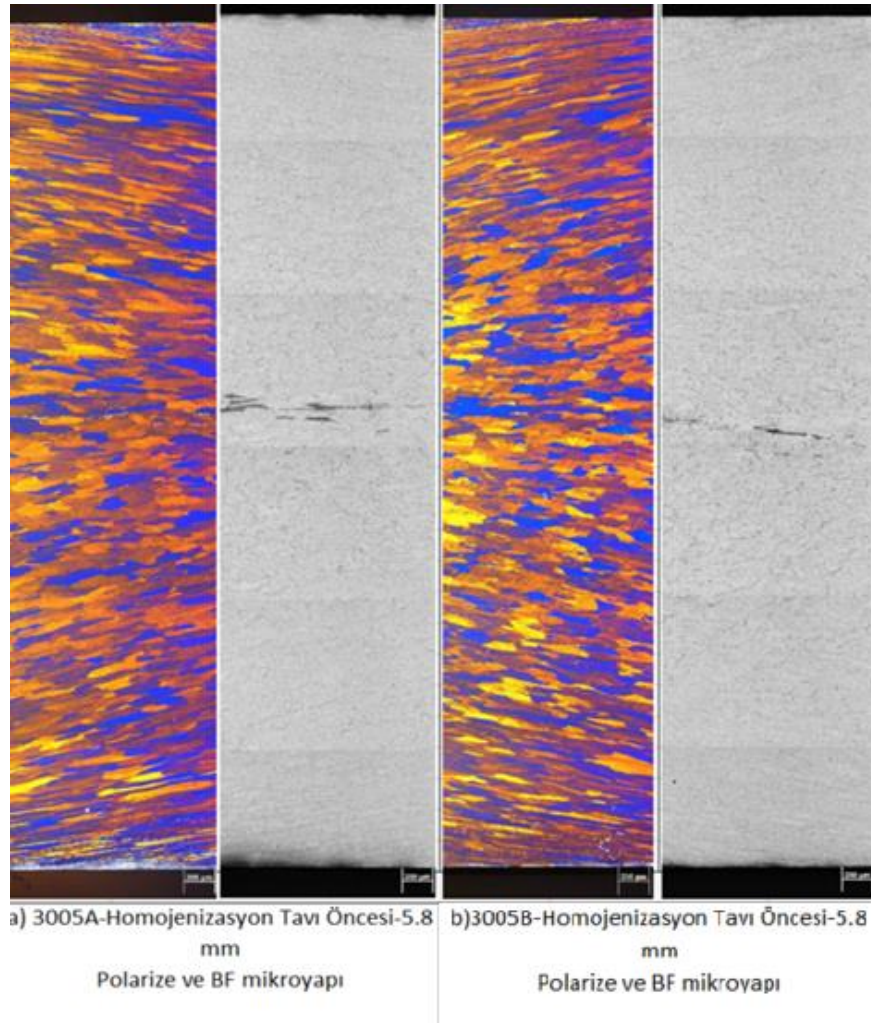
magnezyum kaynaklı çekirdeklenme noktası olduğu için daha fazla ve daha küçük boyutlu taneler oluşmuştur.

BF(aydınlık alan) görüntülerinde ise kesit boyunca intermetalik yapı dağılımı görülebilmektedir. Genel olarak yapıdaki intermetalik dağılımları ve büyüklükleri benzerdir. İkiz merdane döküm sistemindeki katılaşma hızına bağlı olarak, katılaşan levhanın yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farkına bağlı, fazların aniden dağılması gibi nedenlerle merkez hattı segregasyonu adı verilen durum ortaya çıkmaktadır. Bu durum her iki levhada da görülmüştür. İstenmeyen bir durum olarak nitelendirilen merkez hattı segregasyonu ilerleyen termomekanik işlemlerle giderilmesi amaçlanır.

Sonuç olarak; hem 3005A hem de 3005B levhaları için ilerleyen prosesleri engelleyecek bir görüntüye rastlanmamıştır.

İkiz merdaneli döküm sistemi kullanılarak gerçekleştirilen levha üretimlerinde; döküm kalınlığında veya bir miktar haddeleme yapıldıktan sonra çoğu alaşım için homojenizasyon işlemi önemli bir gerekliliktir. Homojenizasyon işlemi, nihai kalınlık ve nihai malzeme beklentisine göre tasarlanmalıdır. İnce kalınlıklara haddeleyebilme, şekil verme (derin çekme, eğme vb.) gibi uygulamalarda homojenizasyon önemli bir faktördür. Homojenizasyon işlemi uygulanmamış levhalarda dökümden gelen kaba intermetalik yapılar ve segregetler nihai işlemlerde sorun çıkarabilir.

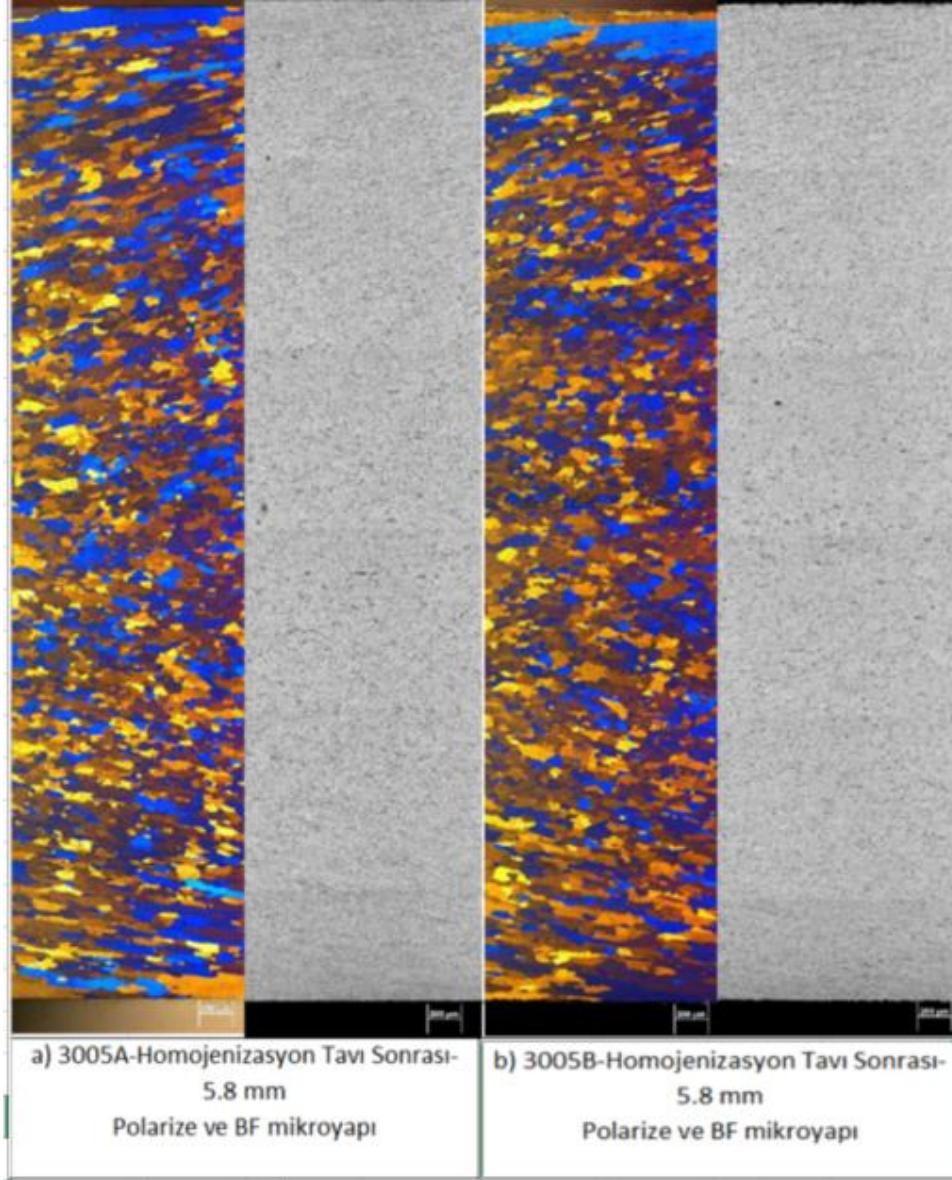
Her 3 proseste de aynı koşullarda homojenizasyon tavlamları gerçekleştirilmiştir. Döküm kalınlığı olan 7.2 mm'den yaklaşık %20 deformasyon oranı ile haddeleme yapıp levhalar 5.8 mm'e inceltirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 6.3'te 5.8 mm'e haddelenmiş levhaların kesit görüntüsü verilmiştir. Polarize görüntüler incelendiğinde; bantlaşıp uzamış tane yapısı ve hadde tekstürünün varlığından söz edilebilir. BF görüntülerde ise, dökümden kalma merkez hattı segregasyonu (MHS) yapısının hala kararlılığını koruduğu gözlemlenmiştir. Tam kesit merkezinde; segregat olmuş çubuksu intermetalik yapıların varlığı görülmüştür. Bu yapıların homojenizasyon tavyıla birlikte giderilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 6.3 3005A ve 3005B alaşımı için homojenizasyon tavlama öncesi BF ve polarize mikroyapılar.

Homojenizasyon tavlama hem 3005A hem de 3005B levhaları için aynı sıcaklık ve sürede uygulanmıştır. Homojenizasyon tavlama sıcaklığı; 520-580°C aralığında bir değerdir. Ancak bu seviye yüksek sıcaklıklarda segregasyon ve homojen olmayan intermetalik yapıların kesit boyunca dağılmış olması sağlanabilir. Aynı zamanda homojenizasyon işlemi bir yeniden kristallenme tavlama işlemidir. Uygulanan deformasyon oranı %20 gibi düşük bir seviye olduğu için; tavlama işleminde yeniden kristallenmenin(rekristalizasyon) sağlanabilmesi için sıcaklığın yüksek tutulması gerekir. Çünkü yeniden kristallenmede itici güç olarak haddeleme etkisiyle yapı içinde biriktirilmiş enerji önemli rol oynar. Eğer bu enerji deformasyon oranına bağlı olarak düşük tutulmuşsa yeniden kristallenme için tavlama sıcaklığı yüksek olmalıdır.

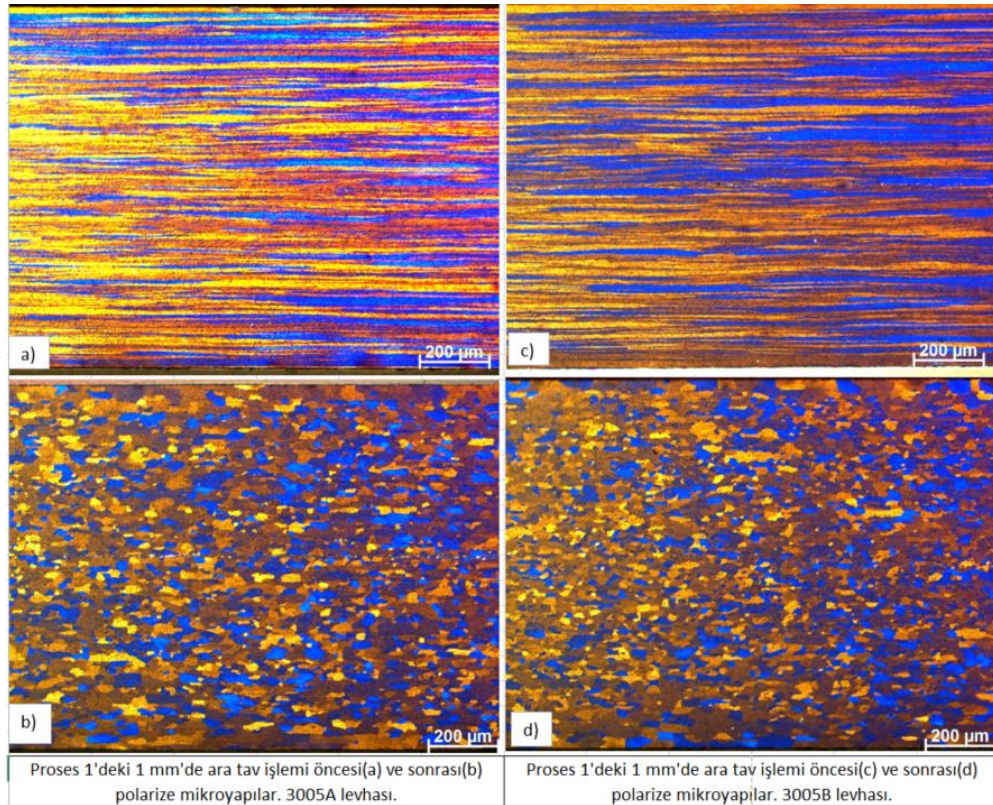
Homojenizasyon sonrası Şekil 6.4'te mikroyapılara bakılacak olursa; polarize görüntülerde tanelerin yeniden kristallenip bir miktar büyüdüğü gözlenmiştir. Fakat döküm ve haddelemeden kalıntı olarak gelen; yönlenmiş yapı kesit yüzeylerinde göze çarpmaktadır. Merkeze yakın bölgede ise; eş-eksenlilik durumu söz konusudur. BF mikroyapılar incelendiğinde; homojenizasyon tavi öncesindeki merkez hattı segregasyonu kesit boyunca küçültülüp dağıtılmıştır. Genel olarak da yapıdaki intermetalik yapıların homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür.



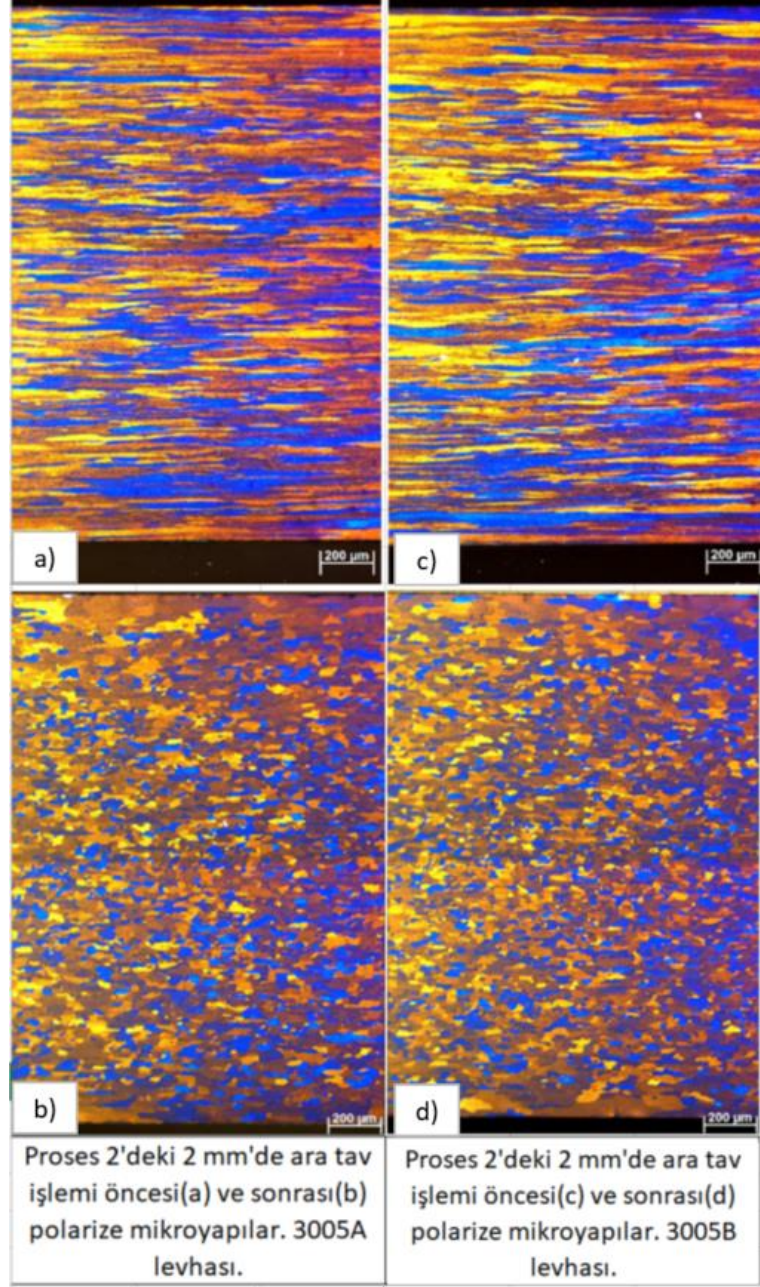
Şekil 6.4 3005A ve 3005B alaşımı için homojenizasyon tavi sonrası BF ve polarize mikroyapılar.

Proses 1’de ara tav yeri homojenizasyon tavından sonra %80 deformasyonla hadde işleminden sonra 1 mm’de konumlandırılmıştır. Proses 2’de ise %65 soğuk deformasyon oranıyla haddeleme yapılarak 2 mm’de ara tav işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kalınlıkta malzemeye 420-460 derece arasında bir ara tav işlemi uygulanmıştır. Ara tavda malzemenin tamamen yeniden kristalize olması amaçlanmıştır. Proses 3’ün deney rotasında ara tav bulunmadığı için mikroyapı çalışması yapılmamıştır. Şekil 6.5’te 3005A ve 3005B levhalarının proses 1’deki 1 mm’de bulunan ara tav işlemi öncesi ve sonrası mikroyapıları Şekil 6.5’te gösterilmiştir.

1 mm’de ara tav öncesi hem 3005A hem de 3005B levhalarının standart hadde tekstürüne sahip oldukları görülmüştür. Ara tav sonrası mikroyapılar da ise yine öncesinde olduğu gibi major bir fark görülmemiştir. Yapı yeniden kristalize bir haldedir. Yüzeydeki tanelerdeki kabalaşma durumu devam etmektedir. Yalnız, 3005B levhasındaki ara tav sonrası yapıdaki tanelerin bir nebze de olsa 3005A’ya göre daha küçük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.5 3005A ve 3005B levhaları için Proses 1’de 1mm’de uygulanan ara tav öncesi ve sonrası polarize mikroyapılar.



Şekil 6.6 3005A ve 3005B levhaları için Proses 2’de 2mm’de uygulanan ara tav öncesi ve sonrası polarize mikroyapılar

Proses 2’de %65 deformasyonla soğuk haddelenmiş levhalar 2 mm’ye inceltiştir. Bu kalınlıkta aynen proses 1’de olduğı gibi aynı sıcaklık ve sürede ara tav işlemi uygulanmıştır. Polarize mikroyapılar Şekil 6.6’da incelendiğinde; ara tav öncesi levhanın hadde tekstürüne sahip olduğı görülmüştür. Tav sonrasında ise yapının tamamen yeniden kristallendiğı görülmüştür. Proses 1’den farklı olarak yüzeydeki kaba tanelerin varlığı daha gözle görülebilir bir şekilde olduğı çıkarımı yapılabilir.

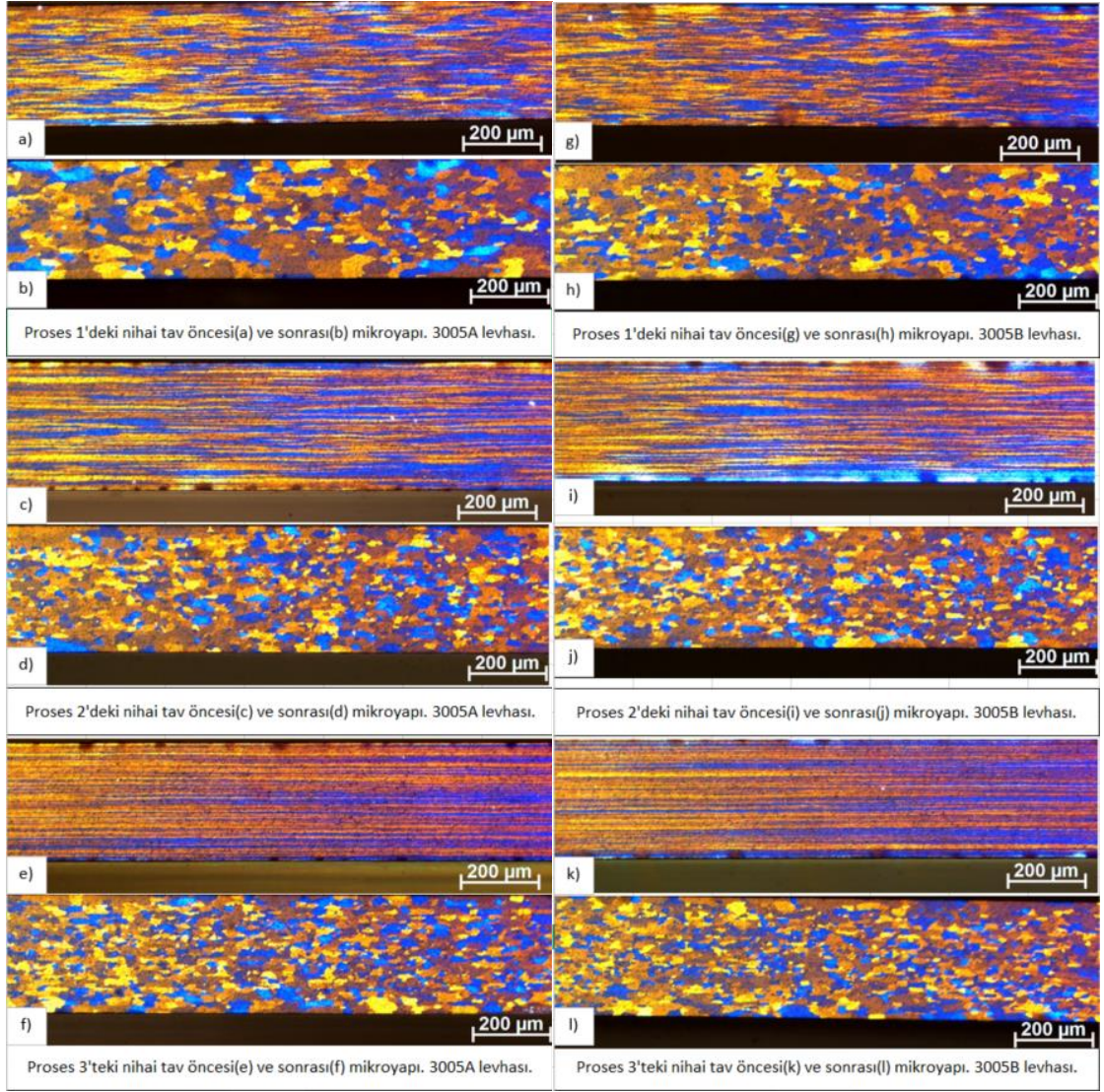
Bunun nedeni ise ara tavın daha yukarıda bir kalınlıkta daha az soğuk deformasyon sonrası gerçekleştirilmesidir.

Hem Proses 1’de hem de Proses 2’de ara tav sonrası istenen rekristalize yapı sağlanmıştır. Proses 2’de 3005A ve 3005B levhalarının tav öncesi-sonrası mikroyapıları neredeyse eştir. Fakat Proses 1’de magnezyum etkisi; tanelerin bir nebze daha küçük oluşması şeklinde kendini göstermiştir. Proses 3’te ara tav bulunmadığı için mikroyapı çalışması gerçekleştirilmemiştir.

Proses 1’de bulunan 1 mm’deki ara tav işleminden sonra %70 deformasyonla 0,30 mm nihai kalınlığa soğuk haddeleme yapılmıştır. Proses 2’de ise 2 mm’de bulunan ara tavadan sonra %85’lik deformasyon oranıyla 0,30 mm’ye soğuk haddeleme gerçekleştirilmiştir. Son olarak proses 3’te 5,8 mm’deki homojenizasyon tavlamasından sonra direkt olarak ara tav uygulanmadan nihai kalınlık olan 0,30 mm’ye %95 deformasyonla haddeleme işlemi yapılmıştır.

Şekil 6.7’de nihai kalınlıkta, nihai tav öncesi ve sonrası polarize mikroyapılar paylaşılmıştır. Tav öncesi mikroyapılar incelendiğinde; hem 3005A hem de 3005B levhalarında bantlaşmış hadde tekstürü gözlemlenmiştir. Fakat, tane incelikleri arasında farklar bulunmaktadır. En ince taneli yapı Proses 3’te görülmüştür. Ardından Proses 2 ve Proses 1 gelmektedir. Bunun nedeni yapılan ara tav işlemi ile ilgilidir. Proses 1’de ara tav nihai kalınlığa en yakın kalınlık olan 1 mm’de yapıldığı için haddeleme tekstürü daha az gözlemlenip, biraz daha kalın taneli olarak göze çarpmaktadır. Proses 2’de Proses 1’e kıyasla nihai kalınlıktan daha uzak bir kalınlık olan 2 mm’de ara tav işlemi gerçekleştirildiği için taneler Proses 1’e kıyasla daha ince bir şekilde oluşmuşlardır. Son olarak Proses 3’te bir ara tav işlemi bulunmadığı için en yakın tavlama işlemi 5,8 mm’deki homojenizasyon tavlamasıdır. Bu kalınlıktan itibaren sürekli 0,30 mm’ye haddeleme yapıldığı için deformasyon tekstürü çok ince taneli olarak ortaya çıkmıştır.

Nihai tav sonrası mikroyapı incelemelerinde önemli derecede farklılıklar bulunmaktadır. Hem 3005A hem de 3005B levhalarında; en kalın taneli yeniden kristalleşmiş yapı Proses 1’de gözlemlenmiştir. Bunun nedeni tav öncesi mikro yapının en kalın mikroyapı olmasıdır. Proses 2 ve Proses 3’teki nihai tav sonrası mikroyapılar birbirine biraz daha benzer olsa da; Proses 3’teki mikroyapı en ince taneli yapıdır.



Şekil 6.7 3005A ve 3005B levhaları için nihai tav öncesi ve sonrası polarize mikroyapılar.

Proses 3'teki yeniden kristallenmiş yapının en ince taneli olmasının sebebi; herhangi bir ara tav işlemi bulunmamasından kaynaklıdır. Çünkü nihai tav öncesi mikroyapı en ince taneli mikroyapıdır. Yeniden kristallenme tekstürü de haddeleme tekstürüne bağlı olarak değişir. Tane boyutları; Proses 1>Proses 2>Proses 3 şeklinde sıralanabilir. Yalnız, 3005B levhasındaki magnezyum oranı fazlalığından dolayı taneler her proseste biraz daha ince şekilde oluşmuştur. Bu durumun derin çekilebilirliğe olumlu etkisi olduğu düşünülmektedir. Levha alaşım farklılıklarına göre tane boyutu sıralaması; Proses A1>Proses B1>Proses A2>Proses B2>Proses A3>Proses B3 şeklinde olduğu söylenebilir.

Nihai tav sonrası görüntülerdeki ortalama tane boyutu intersect metoduyla ölçülmüş olup Tablo 6.1’de paylaşılmıştır.

Tablo 6.1 3005A ve 3005B levhalarının proseslerine ait nihai yapıdaki ortalama tane boyutları.

Levha-Proses	Ortalama Tane Boyutu(μm)
3005A-Proses 1	35
3005A-Proses 2	28,5
3005A-Proses 3	26,5
3005B-Proses 1	32
3005B-Proses 2	27
3005B-Proses 3	25

6.2 Mekanik Özellik İncelemeleri

Nihai kalınlıktaki nihai tav işleminden sonra; üretilmiş levhalara ait olan mekanik özellikleri tespit edebilmek için çekme testine başvurulmuştur. Çekme testi numuneleri 3 yöndeki mekanik özelliklerin tespiti ve anizotropi değerlerini hesaplayabilmek için; 0, 45 ve 90 derece açılarında hazırlanmıştır.

Çekme testi sonuçlarından; toplamdaki 6 proste her yöne ait akma, çekme mukavemeti, % uzama değeri, r değeri, dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi değerleri elde edilmiştir. Bu testler tekrarlı olarak gerçekleştirilip, ortalamaları alınmıştır.

3005A alaşımı için Proses 1, Proses 2 ve Proses 3’ ait çekme testi sonuçları sırasıyla; Tablo 6.2, Tablo 6.3 ve Tablo 6.4’te verilmiştir.

Tablo 6.2 3005A levhası için Proses 1 sonrası nihai mekanik özellikler.

Yön	Akma Muk.(MPa)	Çekme Muk.(MPa)	Uzama(%)	r	$\bar{R}$	ΔR
0	56	135	16,5	0,676		
45	56	136	16,75	0,448	0,572	0,284
90	55	134	15,4	0,714		

Tablo 6.3 3005A levhası için Proses 2 sonrası nihai mekanik özellikler.

Yön	Akma Muk.(MPa)	Çekme Muk.(MPa)	Uzama(%)	r	$\bar{R}$	ΔR
0	58	136	14,4	0,706		
45	59	140	15	0,550	0,632	0,247
90	64	141	15	0,723		

Tablo 6.4 3005A levhası için Proses 3 sonrası nihai mekanik özellikler.

Yön	Akma Muk.(MPa)	Çekme Muk.(MPa)	Uzama(%)	r	$\bar{R}$	ΔR
0	61	139	14	0,631		
45	63	141	17	0,723	0,737	0,027
90	60	141	17	0,870		

3005A alaşımına ait proseslerdeki mekanik özellikler incelenmiştir. Akma ve çekme mukavemetleri arzulanan H0 kondüsyon sınırları içerisinde. 3 proseste de akma,

çekme ve uzamalar birbirine yakın seyretmiştir. Yalnız, dikey ve düzlemsel anizotropi değerleri arasında ciddi farklar söz konusudur. Proses 1’de dikey anizotropi değeri en düşük olan 0,572 değerinde okunmuştur. Düzlemsel anizotropi değeri ise bu proseste 0,247 olarak en yüksek seviyede oluşmuştur. Proses 2’de dikey anizotropi Proses 1’e kıyasla daha yüksek bir değer olan 0,662 seviyesinde ölçülmüştür. 0,171 değerinde de düzlemsel anizotropi görülmüştür. Son olarak Proses 3 anizotropik açıdan en iyi değerlerin görüldüğü proses olmuştur. Dikey anizotropi 3005A levhalarındaki proselerde en yüksek değer olarak 0,737 olarak ölçülmüştür. Diğer yandan düzlemsel anizotropi değeri de oldukça düşük bir değer olan 0,027 seviyesindedir.

Tablo 6.5 3005B levhası için Proses 1 sonrası nihai mekanik özellikler.

<i>Yön</i>	<i>Akma</i> <i>Muk.(MPa)</i>	<i>Çekme</i> <i>Muk.(MPa)</i>	<i>Uzama(%)</i>	<i>r</i>	$\bar{R}$	ΔR
0	58	144	13,5	0,738		
45	60	146	17	0,588	0,632	0,208
90	59	140	13	0,855		

Tablo 6.6 3005B levhası için Proses 2 sonrası nihai mekanik özellikler.

<i>Yön</i>	<i>Akma</i> <i>Muk.(MPa)</i>	<i>Çekme</i> <i>Muk.(MPa)</i>	<i>Uzama(%)</i>	<i>r</i>	$\bar{R}$	ΔR
0	58	144	13,5	0,706		
45	60	146	17	0,550	0,692	0,165
90	59	140	17	0,723		

Tablo 6.7 3005B levhası için Proses 3 sonrası nihai mekanik özellikler.

<i>Yön</i>	<i>Akma</i> <i>Muk.(MPa)</i>	<i>Çekme</i> <i>Muk.(MPa)</i>	<i>Uzama(%)</i>	<i>r</i>	$\bar{R}$	ΔR
0	58	144	13,5	0,780		
45	60	146	17	0,815	0,820	0,011
90	59	140	17	0,872		

3005B alaşımından üretilme levhalar üzerinden gerçekleştirilen çekme testi sonuçları sırasıyla Tablo 6.5, 6.6 ve 6.7’de incelenmiştir. Akma ve çekme mukavemeti değerleri her üç proseste de 3005A alaşımına göre 4-5 MPa seviyesinde yukarıda çıkmıştır. Bunun nedeni olarak magnezyumun %0.2 oranında daha fazla olması söylenebilir. Anizotropi değerlerine bakıldığında ise; Proses 1’de en düşük dikey anizotropi değeri olarak 0,632 sayısı ölçülmüştür. Düzlemsel anizotropi ise 0,208 çıkmıştır. Proses 2’de bir miktar iyileşme görülmüştür. Dikey anizotropi değeri 0,692 olarak okunurken, düzlemsel anizotropi 0,165 olarak okunmuştur. Anizotropi açısından en iyi sonuçlar Proses 3’te elde edilmiştir. Dikey anizotropi 0,820 olarak ölçülmüştür. Düzlemsel anizotropi ise dramatik olarak düşerek yalnızca 0,011 seviyesinde olduğu görülmüştür.

Mekanik test sonuçlarının genel yorumları 3005A ve 3005B prosesleri için karşılaştırmalı olarak maddelenecek olursa;

- 3005A’da akma ve çekme mukavemetleri magnezyum oranına bağlı olarak 4-5 MPa seviyesinde düşük ölçülmüştür.
- Anizotropi açısından her iki levhada da Proses 3>Proses 2>Proses 1 sıralaması yapılabilir.
- 3005B levhasında her prosesin 3005A’daki kendi prosesiyle karşılaştırılması yapıldığında; dikey anizotropi değerleri yüksek, düzlemsel anizotropi değerleri düşük çıkmıştır.
- Tüm 6 proses arasından en yüksek dikey anizotropi değeri 3005B levhasında Proses 3’te 0,820 değeri olarak kaydedilmiştir.

- Tüm 6 proses arasından en düşük düzlemsel anizotropi değeri 3005B levhasında Proses 3'te 0,011 olarak ölçülmüştür.
- Tüm prosesler sonrası derin çekme işleminin ardından oluşabilecek kulak yönleri; düzlemsel anizotropi değerlerinin sıfırdan yüksek çıkmasından dolayı 0° ve 90° derece kulaklanması şeklinde oluşması beklenmektedir.
- Kulaklanma şiddeti sıralaması ise prosesler arasında şu şekilde yapılabilir; Proses A1>Proses A2>Proses B1>Proses B2>Proses A3>Proses B3. Bu sıralama düzlemsel anizotropi değerlerinin yüksekliğine göre yapılmıştır. Değeri en yüksek olan proses en şiddetli kulaklanma davranışını göstermesi beklenmektedir.

Mekanik testler, izotropik derin çekme özelliklerinin (kulaklanma) tahmin edilmesinde yeterli değildir. Bu yüzden reel çıktı sonuçlarının ölçülmesi gerekir. Bunun için Erichsen derin çekme testlerinin yapılması gerekir.

Anizotropi durumundan bağımsız olarak ise, maksimum derin çekme yüksekliğini ölçmek için Erichsen çökertme deneyinin uygulanması gerekir.

6.3 Erichsen Çökertme Testleri

Erichsen çökertme deneyi; levhaların maksimum derin çekilebilme mesafesini ölçmek için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Hazırlanan numuneler Zwick/Roell çekme testi cihazı Erichsen çökertme aparatı kullanılarak teste tabi tutulmuştur. Test sırasındaki yırtılma anındaki kuvvete denk gelen mm cinsinden derinlik Erichsen değeridir. Tablo 6.8'de hem 3005A hem de 3005B numunelerinden gerçekleştirilen proseslere göre Erichsen çökertme testi sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.8 3005A ve 3005B levhası için prosesler sonrası Erichsen çökertme testi değerleri.

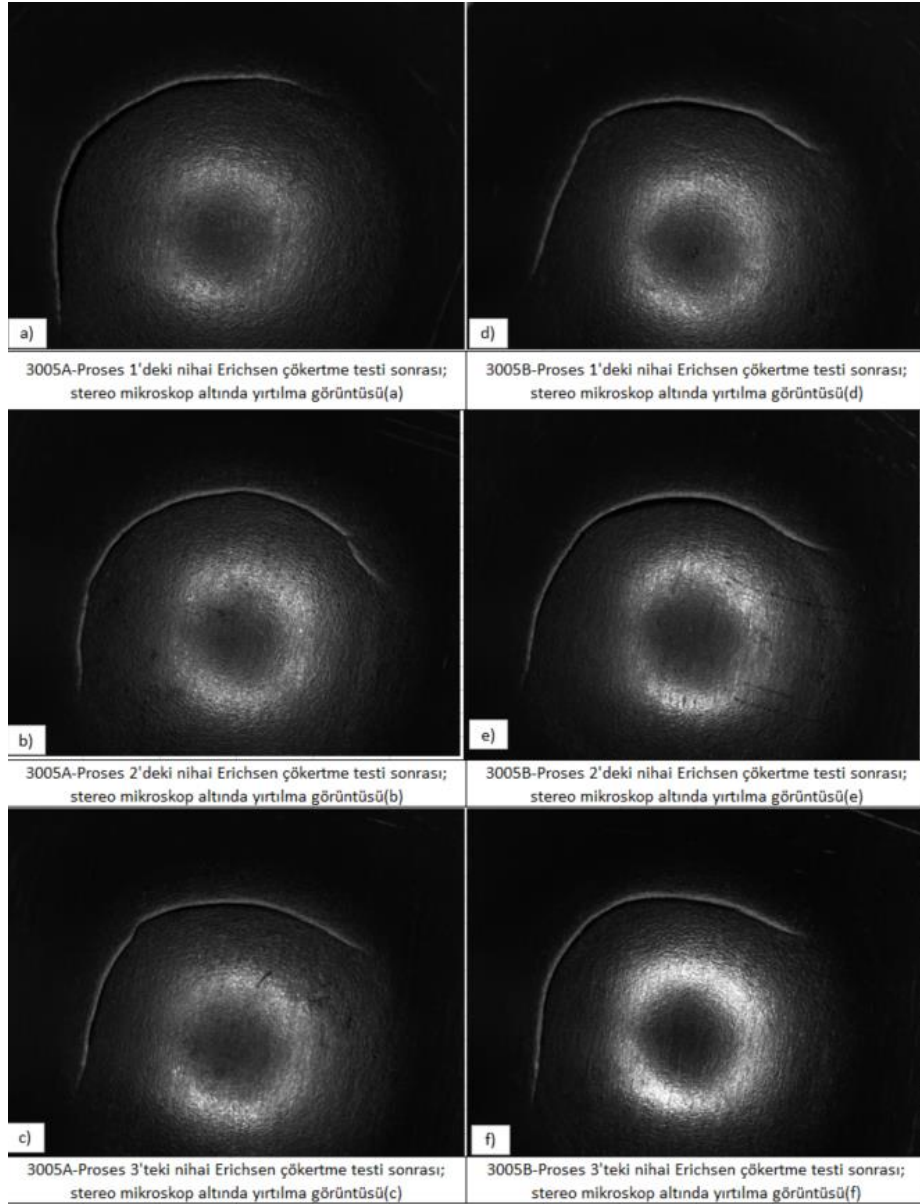
Numune	Erichsen, mm
3005A-Proses 1	7,6
3005A-Proses 2	8,1
3005A-Proses 3	7,6
3005B-Proses 1	7,4
3005B-Proses 2	7,8
3005B-Proses 3	7,4

Erichsen çökertme testleri verilerine bakıldığında birbirine son derece yakın sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek Erichsen değerinin 3005A alaşımında 2 mm’de ara tav işlemi uygulanan Proses 2’de 8,1 mm değeri ile elde edildiği görülmüştür. Erichsen değerinin her iki levhada da Proses 2>Proses 1=Proses 3 şeklinde arttığı gözlemlenmiştir.

Buradan ara tavin derin çekme mesafesine olumlu etkisi olduğu yorumu yapılabilir. Ayrıca magnezyumu düşük olan 3005A levhasında Erichsen mesafeleri 3005B’ye göre bir miktar yüksek çıkmıştır. Buradan yola çıkılarak; magnezyumun levhayı daha mukavim hale getirmesinden kaynaklı Erichsen mesafesinin düştüğü yorumu yapılabilir. Ek olarak 2 mm ara tavlı olan prosesin 1 mm ara tavlı prosese kıyasla daha yüksek Erichsen değerine sahip olması tanelerin daha ince taneli yapıda olmasından kaynaklıdır.

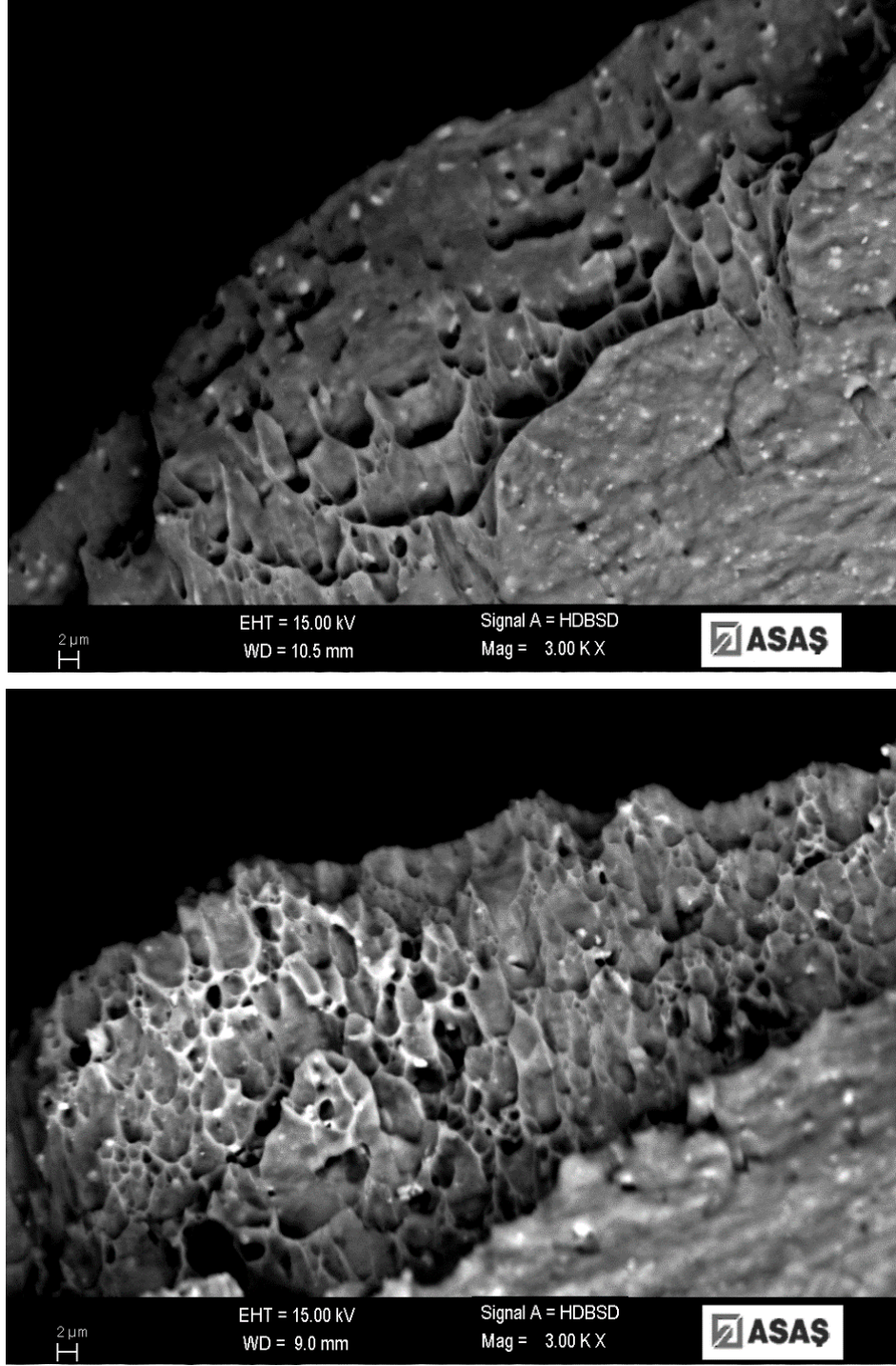
Şekil 6.8’de erichsen çökertme testinden sonra bazı proses numunelerine ait yırtılma yüzeyi görüntüleri stereo mikroskop altında incelenmiştir. Tüm proseslere ait numunelerde yırtılma görüntüleri aynı şekilde oluşmuştur. Yırtılma Erichsen tepeciğinin alt noktasından başlayıp; yarı çember uzuluğunca sürdüğü görülmüştür. Magnezyum oranı ve prosesin baskın etkisi olduğu gözlemlenmemiştir. Mukavemet

ve uzama değerleri tüm proseslerde benzer olduğu için, yırtık oluşma mekanizmasını belirleyen faktörün bu olabileceği düşünülmektedir.



şekil 6.8 Levhaların nihai kalınlıktaki Erichsen krtme testi sonrası stereo mikroskop görüntüleri.

şekil 6.9'da ise erichsen krtme testinden sonra proseslerin numunelerine ait yırtılma yüzeyi görüntüleri taramalı elektron mikroskopunda geri saçılmış electron(BSE) modunda 3000X büyütmede gösterilmiştir. Yırtılma yüzeyleri tüm proses numunelerinde 3005A ve 3005B olmak üzere aynadır. Yapı süngerimsi ve uzamış bir haldedir. Bu durum yapının oldukça sünek bir halde olduğundan kaynaklıdır. Malzeme H0 kondisyonunda yani en yumuşak ve tamamen rekristalize halde olduğu için bu durum ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.9 Levhaların nihai kalınlıktaki Erichsen çökertme testi yırtılma yüzeyinden çekilmiş SEM görüntüsü.

6.4 Erichsen Derin Çekme Testi

Çekme testi incelemelerinde elde edilen anizotropi ile ilgili sonuçların, gerçek derin çekilmiş kupada ortaya çıkan kulaklanma durumuyla örtüşmesini görmek için tüm proseslerdeki numunelere Erichsen derin çekme testi uygulanmıştır.

Erichsen Model-224 derin çekme cihazının kalıp ağzına daire şeklinde kesilen numuneler yerleştirilmiştir. Kalıp cidarlarına ve numunelerin kalıp tarafında kalan yüzeylerine kaydırıcı gres yağı uygulanmazken, numunelerin ıstampa ile temas eden yüzeylerine gres yağı uygulanmıştır. Ardından ıstampanın aşağı doğru hareket ettirilmesi komutu verilmiştir. İstampanın numuneye temasından sonra sac numune kalıp kenarlarına paralel olacak bir biçimde çekilmeye başlanmıştır. Çekme işlemi bittikten sonra numuneler kalıp boşluğundan çıkarılmışlardır.

Derin çekilmiş kupa halindeki numuneler kulaklanma yüzdesi incelemeleri için hassas dijital kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Bu ölçümde derin çekilmiş kupadaki kulaklar ve çukurlar kupanın tabanı sıfır noktası alınarak ölçülmüştür. Kulaklanma yüzdesi hesaplanırken aşağıdaki eşitlikler kullanılır;

Ortalama kulak tepesi (hp) ve kulak çukuru (hv) değerleri;

$$hp = \frac{hp1 + hp2 + hp3 + \dots}{\text{kulak tepesi sayısı}} \quad (6.1)$$

$$hv = \frac{hv1 + hv2 + hv3 + \dots}{\text{kulak çukuru sayısı}} \quad (6.2)$$

Ortalama kulak yüksekliği (he);

$$he = hp - hv \quad (6.3)$$

Ortalama derin çekilmiş parka yüksekliği (h);

$$h = \frac{hp + hv}{2} \quad (6.4)$$

Kulaklanma yüzdesi (Z);

$$Z = \left(\frac{h_e}{h}\right) \times 100 \quad (6.5)$$

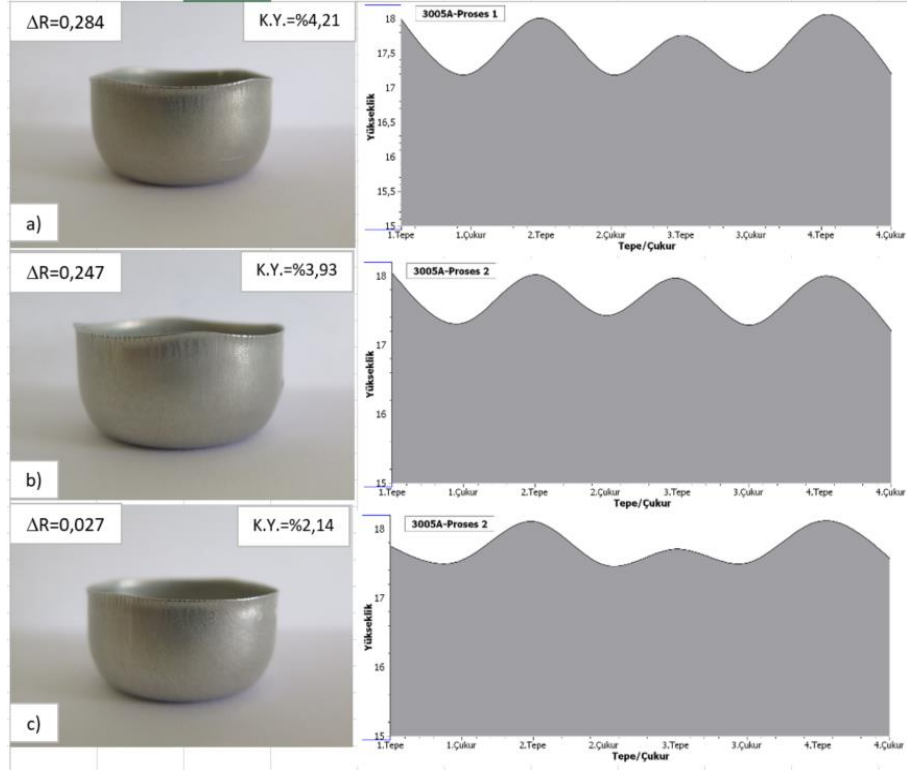
Bu eşitliklere göre her bir derin çekilmiş numune için kulaklanma yüzdesi hesaplamaları yapılmıştır. Buna göre her bir numunenin kulaklanma yüzdeleri;

- 3005A-Proses 1 = %4,21
- 3005A-Proses 2 = %3,93
- 3005A-Proses 3 = %2,14
- 3005B-Proses 1 = %2,97
- 3005B-Proses 2 = %2,88
- 3005B-Proses 3 = %1,05

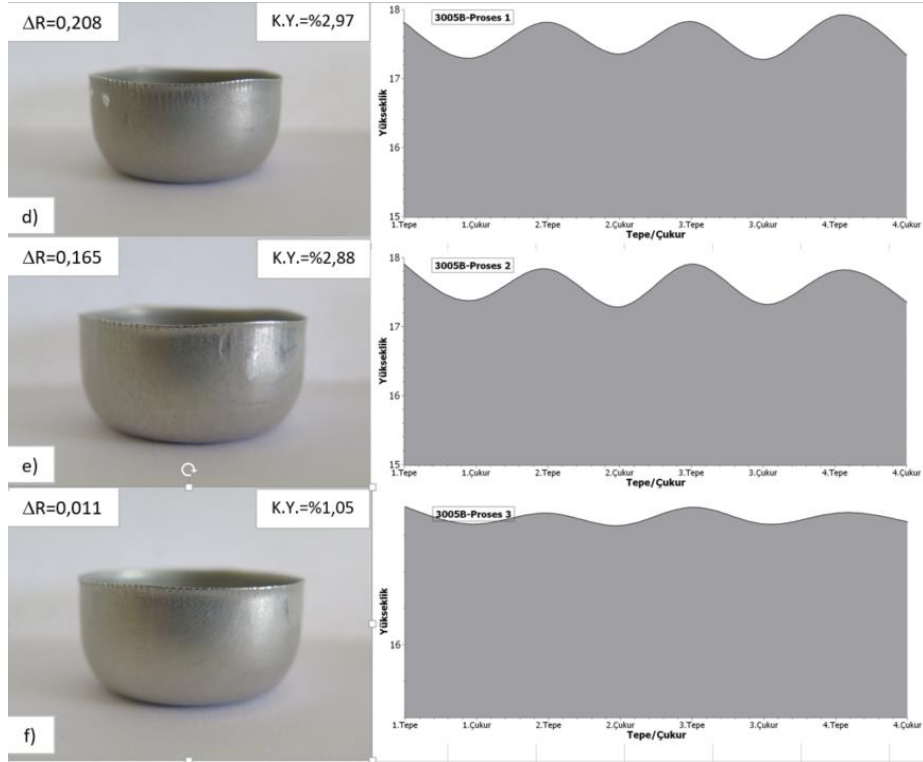
Şeklinde ölçülmüştür.

Şekil 6.10'da 3005A'ya, Şekil 6.11'de ise 3005B'ye ait proseslerdeki derin çekilmiş parçanın görüntüsü ve her bir görüntünün yanında kulaklanma grafiği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre prosesler bazında sıralama yapıldığında kulaklanma yüzdesi Proses 1 > Proses 2 > Proses 3 şeklinde çıkmıştır. Hem 3005A'da hem de 3005B'ye ait numunelerde ara tavsız olan Proses 3'ün kulaklanma davranışını yüksek derecede iyileştirdiği görülmüştür. Proses 3'ün ardından 2 mm'de ara tav uygulanan Proses 2, sonrasında da 1 mm'de ara tav uygulanan Proses 1 gelmiştir. Buradan yola çıkarak ara tavin anizotropik özellikleri kötü etkilediği söylenebilir. Ara tavin nihai kalınlıktan en uzak olduğu Proses 2 ise Proses 1'e göre küçük bir farkla daha iyi çıkmıştır.

Magnezyum etkisi ise her proseste kendini oldukça baskın bir şekilde göstermiştir. Ara tavlı proseslerde %30 civarı kulaklanma performansında iyileşme gözlemlenirken; ara tavsız proseste %100 oranında bir iyileşme söz konusudur. Nihai sonuç olarak %0,6 magnezyuma sahip 3005B levhası ara tavsız Proses 3'te en iyi kulaklanma performansını göstermiştir.



Şekil 6.10 3005A alaşımındaki derin çekilmiş numuneler ve kulaklanma grafiklerinin görüntüsü.(a=Proses 1, b=Proses 2, c=Proses 3)



Şekil 6.11 3005B alaşımındaki derin çekilmiş numuneler ve kulaklanma grafiklerinin görüntüsü.(d=Proses 1, e=Proses 2, f=Proses 3)

Çekme testi sonuçlarından elde edilen düzlemsel anizotropi sonuçlarıyla kulaklanma oranı karşılaştırmaları Tablo 6.9’da gösterilmiştir. Düzlemsel anizotropinin artışıyla birlikte kulaklanma şiddetinin artması beklenmekteydi. Gerçek derin çekilmiş numunelere bakıldığında düzlemsel anizotropi ve kulaklanma şiddeti arasında tam bir uyum söz konusu olduğu ortaya konulmuştur.

Tablo 6.9 Tüm proseslerdeki kulaklanma yüzdesi ve düzlemsel anizotropi değeri karşılaştırmaları.

Levha-Proses	Düzlemsel Anizotropi(ΔR)	Kulaklanma Yüzdesi
3005A-Proses 1	0,284	%4,21
3005A-Proses 2	0,247	%3,93
3005A-Proses 3	0,027	%2,14
3005B-Proses 1	0,208	%2,97
3005B-Proses 2	0,165	%2,88
3005B-Proses 3	0,011	%1,05

Tüm derin çekilmiş numunelerde kulak oluşumları hadde yönüne göre 0 ve 90 yönlerinde oluşmuştur. Bu durum literatürdeki; “düzlemsel anizotropi değeri eğer sıfırdan artı yönde büyük olursa kulaklanma 0 ve 90 yönlerinde oluşur” bilgisine bir ispattır. Aynı zamanda kulaklanmanın 0 ve 90 derece yönlerinde oluşmasının nedeni ise nihai mikroyapının rekristalizasyon tekstüründe olmasından kaynaklıdır. Tüm levha numuneleri H0 kondisyonunda üretildiği için ve nihai yapının tamamen rekristalize halde olduğu görüldüğü için bu durum beklenilmekteydi.

1. İkiz merdaneli sürekli döküm yönteminden elde edilmiş %0,4 ve %0,6 Mg oranına sahip levhaların polarize ışık altında mikroyapısı incelendiğinde; döküm yönteminin doğasının getirdiği yüzeydeki aşırı tane incelmesi durumu her iki levhada da gözlemlenmiştir. Merkeze doğru tanelerin daha eş eksenli bir hal aldığı görülmüştür. 3005B levhası %0,2 oranında daha fazla magnezyum içerdiği için tane yapısı 3005A'ya göre bir miktar ince çıkmıştır.
2. Her iki levhadan da BF mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ise; klasik ikiz merdaneli döküm yapısına ait MHS(Merkez Hattı Segregasyonu) durumu gözlemlenmiştir. Bu durum; tam kesit merkezinde ani soğuma etkisiyle kesit merkezinde hapsolmuş ve segrege halde forme olmuş intermetaliklerdir. Homojenizasyon taviyla yapı boyunca dağıtılması hedeflenmiştir.
3. Her üç proseste de literatürde de olduğu gibi homojenizasyon deformasyon sonrası gerçekleştirilmiştir. Döküm kalınlığında homojenizasyon yapmanın aşırı tane büyümesine sebebiyet vermesi nedeniyle kaçınılmıştır.
4. Homojenizasyon tavi öncesi mikroyapılar incelendiğinde; her iki levhada da yönlenmiş hadde tekstürü hakimdir. Dökümden gelme MHS yapısının varlığını sürdürdüğü görülmektedir. Homojenizasyon tavi sonrası mikroyapılara bakıldığında ise; polarize görüntülerde yüzeye yakın tanelerde yönlenme ve bir miktar kabalaşma durumunun olduğu görülmüştür. BF görüntülerde ise muntazam bir şekilde MHS yapısının dağıtılarak; tamamen homojen bir yapı görüntüsü elde edilmiştir.
5. Proses 1'de her iki levhaya da homojenizasyon tavından sonra %80 deformasyonla soğuk hadde uygulanarak 1 mm'ye inceltirilmiştir. Bu kalınlıkta ara tav öncesi mikroyapılara bakıldığında; her iki levhanın da bantlaşmış deformasyon tekstürüne sahip olduğu söylenebilir. Her iki levhaya da aynı sıcaklıkta uygulanan ara tav işleminden sonra mikroyapılar incelendiğinde; 3005A levhasının tamamen rekristalize olduğu ve yüzeydeki tane kabalaşmasının varlığını sürdürdüğü gözlemlenmiştir. 3005B'de ise magnezyum etkisinden kaynaklı olarak 3005A'ya göre daha ince forme

olmuş rekristalize taneler ve yüzeydeki tane kabalaşmasının minimal bir şekilde varlığını sürdürdüğü görülmüştür.

6. Proses 2’de her iki levhaya da homojenizasyon sonrası %65 deformasyon sonrası 2 mm kalınlığında ara tav işlemi uygulanmıştır. Ara tav öncesi tane yapısına bakıldığında; Proses 1’e kıyasla daha kalın taneler görülmüştür. Bunun nedeni homojenizasyon tavından sonra daha az deformasyon uygulanmış olmasıdır. Ara tav sonrası mikroyapılarda ise tamamen rekristalizasyon durumu görülmüştür. Ayrıca Proses 1’e göre daha kaba taneler oluşmuştur.
7. Her üç proste de numuneler nihai kalınlık olan 0,30 mm’ye haddelenip nihai yeniden kristalleşme tavı uygulanmıştır. Nihai tav öncesi mikroyapılar incelendiğinde Proses 3’ün yapısının en ince taneli yapı olduğu görülmüştür. Ardından Proses 2 ve Proses 1 takip etmiştir. Bunun nedeni Proses 3’te ara tav bulunmadığı için deformasyon etkisi daha baskın hissedilmesidir. Nihai tav sonrası mikroyapılarda ise 3005B levhasının Proses 3 mikroyapısı en ince taneli mikroyapı olarak göze çarpmaktadır. 3005A levhalarında da en ince taneli yapı Proses 3 yapısıdır. Fakat 3005B’nin biraz daha ince taneli çıkmasının nedeni yapıdaki magnezyum fazlalığıdır. Proses 1’in her iki levhada da en kalın taneli yapıya sahip olduğu yorumu yapılabilir. Yüzey kabalaşması açısından bakıldığında ise yine en iyi durum 3005B-Proses 3 numunesindedir.
8. Mekanik özellikler incelendiğinde her levhanın kendi içindeki proseslerinde akma, çekme mukavemetleri ve % uzamaları benzerlik göstermektedir. 3005B ihtiva ettiği fazla magnezyumdan dolayı 4-5 MPa seviyesinde daha yüksek sertliğe sahiptir.
9. Çekme testinden elde edilen anizotropik bulgularda ise; en düşük düzlemsel anizotropi katsayısının 3005B-Proses3, en yüksek dikey anizotropi katsayısının da yine aynı şekilde 3005B-Proses 3’te olduğu görülmüştür. Prosesler bazında inceleme yapıldığında her iki levhada da düzlemsel anizotropi; Proses 1 > Proses 2 > Proses3, dikey anizotropi ise Proses 3 > Proses 2 > Proses 1 şeklinde elde edilmiştir.
10. 3005B numunelerinin anizotropik değerleri 3005A’ya göre her eş proste daha iyi şekilde ölçülmüştür. Kulaklanma açısından alaşım farklılığı gösteren

levhalar ve prosesler bir arada incelendiğinde kulaklanma şiddetinin düzlemsel anizotropi verilerine göre; 3005A1>3005A2>3005B1>3005B2>3005A3>3005B3 şekliyle vuku bulması beklenmiştir. 3005B levhası Proses 3'teki düzlemsel anizotropi değeri 0,011 olarak okunduğu için çok düşük şiddette kulaklanma oluşması beklenmektedir. Ayrıca tüm proseslerdeki düzlemsel anizotropi değerleri sıfırdan artı yönde büyük çıktığı için kulakların 0 ve 90 derece yönlerinde oluşması beklenmiştir.

11. Erichsen çökertme testi sonuçları incelendiğinde ise; anizotropik bulgulardan farklı olarak proses bünyesindeki ara tav varlığının maksimum derin çekilebilme mesafesini olumlu etkilediği görülmüştür. 2 mm'de ara tava sahip Proses 2'de, en yüksek Erichsen değerleri okunmuştur. Bu durumun sebebi ara tavin %uzama değerlerini arttırmasıdır. Proses 2 ayrıca ince taneli bir yapıya sahip olduğu için Erichsen değerleri yüksek ölçülmüştür. Proses 1'de de ara tav olmasına karşın nihai mikroyapıdaki kalın tane durumu Erichsen değerlerini bir miktar düşürmüştür. Proses 3'te en ince taneli yapı görülmesine rağmen, yapının sertliğinden dolayı Proses 2'ye kıyasla Erichsen değerleri görece düşük çıkmıştır.
12. Erichsen çökertme testinde levhalar bazında sonuçlar incelendiğinde en yüksek değerler düşük magnezyumlu 3005A levhasında görülmüştür. Buradan magnezyumun yapıyı daha mukavim hale getirmesinden maksimum Erichsen değerini düşürdüğü yorumu yapılabilir
13. Mekanik testlerden elde edilen anizotropi verilerinden yola çıkılarak yapılan kulaklanma davranışı tahminlerinin gerçek derin çekilmiş parçayla uyuşup uyuşmadığını görmek için Erichsen derin çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında düzlemsel anizotropi verileriyle gerçek kulaklanma yüzdeleri arasında doğru orantının olduğu kanıtlanmıştır.
14. Derin çekilmiş parçalara bakıldığında her iki levhada da kulaklanmanın en düşük ara tavsız Proses 3'te olduğu gözlemlenmiştir. Buradan ara tavin kulaklanma davranışını kötü etkilediği yorumu yapılabilir. Levhalar bazında inceleme yapıldığında ise magnezyum etkisinin her proseste kulaklanmayı ciddi şekilde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. En düşük kulaklanma yüzdesi 3005B levhasına ait ara tavsız Proses 3'te %1,05 oranında okunmuştur.

Ardından 3005A levhasına ait ara tavsız Proses 3'te %2,14 oranında kulaklanma görülmüştür. Her iki levhada da Proses 2'nin çok düşük bir farkla Proses 1'e göre daha iyi kulaklanma performansı sergilediği görülmüştür.

15. Genel olarak yorum yapıldığında; ince taneli mikroyapının, düşük düzlemsel-yüksek dikey anizotropi değerlerinin, ve yüksek magnezyum oranının derin çekme davranışını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Erichsen çökertme testi değerinde ise ara tavın ve düşük magnezyum oranının değeri yükselttiği görülmüştür.
16. Malzeme dokusunun derin çekilebilme kabiliyeti ile ilişkisini ortaya çıkarmak için X-Ray Diffraction(XRD) cihazında tekstür analizi modunda numunelere ait pole figure görüntülerinin çıkarılıp yorumlanması önerilmiştir.

- [1] Product markets - automotive: The Aluminum Association. Product Markets Automotive | The Aluminum Association. (n.d.). Retrieved December 15, 2021, from <https://www.aluminum.org/automotive>
- [2] Shriwas, Ankitkumar K. and V. C. Kale. "" Impact of Aluminium Alloys and Microstructures on Engineering Properties-Review "" (2016).
- [3] Gülver, M. (2019). İkiz Merdane Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilen 3005 Alüminyum Alaşımının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetinin Optimize Edilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [4] Doğan, Ç. (2018). 3XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarında Magnezyum ve Alternatif Proseslerin Etkisinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi
- [5] Yumuşak, C. (2015). İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilen 3XXX Alüminyum Alaşımlarının Derin Çekilebilirlik Özelliklerinin Geliştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi
- [6] Roth, J.P., (1966). "Diagnosis of Automata Failures: A Calculus and a Method", IBM Journal of Research and Development, 10: 278-291.
- [7] Robert E. Sanders, Jr., February 2001, Technology Innovation in Aluminum Products, JOM, 21-25
- [8] Ana Metal Sanayileri Özel İhtisas Komisyonu, "Alüminyum Çalışma Grubu Raporu", TC Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Yayın No:DPT 2406-ÖİK:467, 1995.
- [9] Yağcıgil, H., "Alüminyum Mamulleri Sanayi", Türkiye İş Bankası A.Ş. Genel Müdürlük, İktisadi Araştırma ve Planlama Müdürlüğü, 1997
- [10] Cobden, R. (n.d.). Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys . TALAT Lecture 1501.
- [11] Davis. (1996). Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Special Handbook, ASM International, 3-59.
- [12] Polmear, I., Stjohn, D., Nie, J.F. ve Qian M. (2017), Metallurgy of the Light Metals, LightAlloys (Fifth Ed.), 157-263. doi:10.1016/B978-0-08-099431-4.00004-X
- [13] Kaufmann. ve J.G. (2000). Application for Aluminium Alloys and Tempers. Chapter 6, 87-118.
- [14] Gilbert, K.J. (2000). Introduction to Aluminium Alloys and Tempers. ASM International, 258-259.
- [15] Totten, G., & MacKenzie, D. (2003). Handbook of Aluminium. In A. Sverdlin, Introduction to Aluminium (pp. 1-32). Illinois: Marcel Dekker.

- [16] Addemir, O. Demir Dışı Metaller Üretimi Ders Notları.
- [17] Arslan, S. (2016). Kırmızı Çamurun Susuzlandırma Performansının Arttırılması (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [18] TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası. Alüminyum Raporu. Alüminyum Komisyonu, 1-9.
- [19] Alper G, Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi ile Üretilmiş 5052-5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetinin Belirlenmesi
- [20] Sun, N., Patterson, B. R., Suni, J. P., Simielli, E. A., Weiland, H., & Allard, L. F. (2006). Microstructural evolution in twin roll cast AA3105 during homogenization. *Materials Science and Engineering: A*, 416 (1-2), 232-239. doi:10.1016/j.msea.2005.10.018
- [21] Ünal. (2004). Continuous Casting of Aluminum, Patent No: US 6,672,368 B2
- [22] Groover, Mikell P., 2016. Principles of Modern Manufacturing, Wiley
- [23] Delikanlı, K., 1992 Soğuk Haddeleniş Teknik Alüminyumun Derin Çekilmesinde Tavlama süresi ve Sıcaklığının Şekillendirme Kabiliyetine Etkileri, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- [24] Demirci, H.İ., 2002. Yüksek Hızda Şekillendirmeye Etki Eden Kalıp Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] Bakkaloğlu, A., 2014. Sac Şekillendirme Prosesleri Ders Notları, Yıldız Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [26] Çapan, L., ve Demir, C., 1995. Alüminyum levhalarda derin çekilebilirlik ve mekanik özellikler arasındaki ilişkiler, *Metal Dünyası*, 27-28, 21-27.
- [27] American Society for Metals. (1978). Metals handbook: volume 2. In Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (9th ed., Vol. 2, pp. 57–59). essay.
- [28] Singh, C.P. ve Agnihotri, G. (2015). Study of Deep Drawing Process Parameters: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5, 1-10.
- [29] Chandramouli, R. Cup Drawing or Deep Drawing, Joint Initiative of IITs and IISc, 1-9. (2011)
- [30] Swapna, D., Rao, C.S. ve Radhika, S. (2017). A Review on Deep Drawing Process. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, 146-149.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. ÖZÇETİN, Y., GÜLER, K. A., ULUS, A., & İNEL, C. (2021). INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMOTIVE SCIENCE AND TECHNOLOGY. In *Isı Kalkanı Parçası İçin İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Tekniğiyle Üretilmiş 3005 Alüminyum Alaşımında Termomekanik Proseslerin Derin Çekilebilme Kabiliyetine Etkisi*. Ankara; Otomotiv Mühendisleri Derneği/Gazi Üniversitesi. Retrieved September 11, 2021, from <http://isastech.org/volumetwo>.