142969

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM SÜREKLİ DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ 5052 – 5182 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK KABİLİYETLERİNİN BELİRLENMESİ

142969

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. M. Gökhan ALPER

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

EKİM 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM SÜREKLİ DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ 5052 – 5182 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK KABİLİYETLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. M. Gökhan ALPER

Enstitü No : 506981056

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : Eylül 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : Ekim 2003

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. E.Sabri KAYALI** S. Kayalı

Diğer Jüri Üyeleri **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU**

Prof. Dr. Mehmet KOZ (Marmara Üni.)

EKİM 2003

ÖNSÖZ

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, emeklerinin ve karşılıksız sevgilerinin geri ödenmesi çok güç olan aileme ve hanımıma en içten saygı ve sevgilerimi sunar, teşekkürü bir borç bilirim.

Üniversiteye başladığım Lisans yıllarından bugüne kadar sonuçları sürekli sorgulamayı ve olaylara başka açılardan bakmayı öğreten, bana karşı inanılmaz sabır göstererek mesleki gelişimime katkıda bulunan ve çok ciddi rahatsızlık geçirmesine rağmen çalışkanlık ve yol göstericiliğinden hiç vazgeçmeyen sayın hocam Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya yardımlarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Şekillendirilebilirlik gibi zor bir konuda hiçbir yardımını esirgemeyen ve yol gösteren, çıkmaz yola girdiğimde ana yola çıkaran Metalurji ve Malzeme Müh. Dr. Murat DÜNDAR'a ve tez savunmasında olumlu eleştirileri ile tezimin gelişmesini sağlayan Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na yardımları için teşekkürü bir borç bilirim.

Deney çalışmalarımda yardımcı olan ASSAN Alüminyum Test Laboratuarı çalışanlarına teşekkür ederim.

İstanbul, Ekim 2003 M.Gökhan ALPER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET x
SUMMARY xii

1. GİRİŞ 1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı 1

2. ALÜMİNYUMUN TARİHÇESİ, GENEL ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİMİ 3
2.1. Alüminyum Tarihçesi 3
2.2. Alüminyum Genel Özellikleri 5
2.3. Alüminyum Üretimi 9

3. SÜREKLİ LEVHA DÖKÜM TEKNİĞİ 15
3.1. Genel Bilgi 15
3.2. Temel Proses Elemanları 20
3.2.1. Ergimiş Metal Beslenmesi 20
3.2.2. Döküm Merdane Sistemi 21
3.2.3. Döküm Bölgesi 22
3.2.4. Merdane / Rulo Ara Yüzeyi 22
3.3. Döküm Mikroyapısı 23
3.4. Katılaşma Mekanizması 25
3.5. Döküm Hataları 25

4. ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK 26
4.1. Genel Bilgi 26
4.2. Şekillendirme Çeşitleri 28
4.2.1. Derin Çekme 28
4.2.2. Bükme 32
4.2.3. Gererek Şekil Verme 34
4.2.4. Soğuk Haddeleme 36
4.2.5. Diğer Şekillendirme Çeşitleri 43
4.3. Şekillendirme Hataları 46
4.3.1. Eğme Hataları 46
4.3.2. Derin Çekme Hataları 47
4.3.2.1. Kulaklanma 48
4.3.2.2 Yüzey Pürüzlülüğü 50
4.3.2.3 Lüder Çizgileri 50
4.3.2.4. Looper Çizgileri 51
4.3.2.5. Kırışmalar 51

4.3.2.6. Çatlamalar 51
4.3.3. Gererek Şekillendirme Hataları 52
4.4. Şekillendirme Sınır Diyagramları 53
4.4.1. Genel Bilgi 53
4.4.2. ŞSD'nin Çizilmesi 60
4.4.2.1. Ağ dokusu (Grid Patern) Oluşturma Metodları 60
4.4.2.2. Şekillendirme Sonrası Grid Ölçümü 63
4.5. ŞSD'de Kırılma Mekaniği 65
4.5.1. Negatif En Küçük Birim Şekil Değiştirme Bölgesindeki Kırılma 65
4.5.1.1. Yayılma (Difüzyon) kararsızlığı 65
4.5.1.2. Bölgesel Karasızlık 66
4.5.2. Pozitif En Küçük Birim Şekil Değiştirme Bölgesindeki Kırılma 67
4.5.2.1. Kararsızlığa dayalı kriter 67
4.5.2.2. Sünek kırılmaya dayalı kriter 67

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 69
5.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler 69
5.2. Kullanılan Cihazlar 69
5.2.1. Hidrolik Şişirme Test Düzeneği 70
5.3. Deneylerin Yapılışı 71
5.3.1. Metalografik İnceleme 71
5.3.2. Mekanik Özelliklerin Tesbiti 77
5.3.3. Erichsen Derinliği Tesbiti 83
5.3.4. Şekillendirme Sınır Diyagramları Sonuçları 84
5.3.5. Kırılma Yüzeylerinin SEM'de İncelenmesi 90

6. GENEL SONUÇLAR 96

KAYNAKLAR 98

EKLER 101

EK A. Tablo A.1. 5052 ve 5182 alaşımlarının test sonuçlarına göre gridlerin ölçüm değerleri 101

ÖZGEÇMİŞ 102

KISALTMALAR

TRC	: İkiz Merdane Döküm Teknolojisi
HF	: Hidroflorik Asit
Ş.S.D.	: Şekillendirme Sınır Diyagramı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Saçınım Spektrometresi
AA	: Amerikan Alüminyum Birliği
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Malzeme ve Test Derneği
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
MHS	: Merkez Hattı Segregasyonu
RADAR	: Radio Detection and Ranging
MPa	: Mega Pascal
N	: Newton
A.B.D.	: Amerika Birleşik Devletleri
DC	: Direkt (Geleneksel) Döküm

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Alüminyumun fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırılması	6
Tablo 2.2.	Alüminyumun alternatif olduğu malzeme ve kullanım alanları	8
Tablo 2.3.	Alüminyum ve alaşımlarının AA standardına göre gösteriliş biçimleri	9
Tablo 2.4.	Bazı metallerin birincil ve ikincil üretimleri için termal enerji gereksinimleri	12
Tablo 2.5.	Kıta ve bölgelere göre 1950 – 1990 yılları arasındaki birincil alüminyum üretimleri (1000 ton)	13
Tablo 2.6.	Bazı Avrupa ülkelerinin 1950 – 1990 yılları arasındaki birincil ve ikincil alüminyum üretimleri (1000 ton)	13
Tablo 2.7.	Endüstrileşmiş ülkelerin 1950 – 1990 yılları arasındaki kişi başına alüminyum tüketimleri (kg)	14
Tablo 3.1.	Sürekli levha döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımları	19
Tablo 3.2.	Merdane Ayırma Kuvvetini Etkileyen faktörler	20
Tablo 3.3.	Al-Mg alaşımlarında oluşabilecek muhtemel denge fazları	24
Tablo 4.1.	Gererek Şekillendirmede en çok kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve gerilebilirlik oranları..	35
Tablo 5.1.	Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları	69
Tablo 5.2.	5052 alüminyum alaşımının (350°C/4h tav) sonucu çeşitli yönlerde (0-45-90°) yapılan çekme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikler	77
Tablo 5.3.	5182 alüminyum alaşımının (410°C/4h tav) sonucu çeşitli yönlerde (0-45-90°) yapılan çekme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikler	78
Tablo 5.4.	5052-5182 alüminyum alaşımlarının çeşitli yönlerde (0-45-90°) yapılan çekme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikleri ve anizotropi katsayıları ve 5182-5754 DC verileri ile karşılaştırması	80
Tablo 5.5.	5052 ve 5182 alaşımlı malzemelerin Erichsen derinliği ölçüm test sonuçları	82
Tablo 5.6.	Çekme testi numune ebatları	83

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	: Alüminyum Elektroliz Hücresi	11
Şekil 2.2	: Alüminyum yarı-sürekli döküm teknikleri	11
Şekil 2.3	: Endüstrisi gelişmiş ülkelerde alüminyum ve alaşımlarının tüketimlerinin nihai kulanım alanına göre dağılımı	14
Şekil 3.1	: Twin-Roll Caster detay görüntüsü	15
Şekil 3.2	: Tipik bir Sürekli Döküm Hattı Akış Şeması	16
Şekil 3.3	: Tandiş – Tip – Döküm Makinesi Katılaşma Hattı Akış Şeması	20
Şekil 3.4	: TRC'de kullanılan içten su soğutmalı merdane örneği	21
Şekil 3.5	: TRC'de katılaşma bölgesinin şematik gösterimi	22
Şekil 4.1	: Derin çekme işlemine ait şematik örnek	28
Şekil 4.2	: Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu	29
Şekil 4.3	: Bükme işleminin basit olarak şematik gösterimi	32
Şekil 4.4	: Gererek şekillendirmenin basit olarak şematik gösterimi	36
Şekil 4.5	: Haddeleme işleminde temas yayının ve ezmenin sembolik gösterimi	37
Şekil 4.6	: Haddeleme işleminde esnasında merdanelerin bükülmesi	38
Şekil 4.7	: Pozitif bombe sonucu merdanelerin düzelmesi	38
Şekil 4.8	: Merdane bombelerinin gösterimi	39
Şekil 4.9	: 2'li hadde , b) 4'lü hadde , c) 6'lı hadde	39
Şekil 4.10	: a) 6'lı hadde , b) Sendzimir haddesi	40
Şekil 4.11	: 2'li Grup Hadde	40
Şekil 4.12	: 3'lü grup Hadde	40
Şekil 4.13	: Haddeleme teorisi gösterimi	41
Şekil 4.14	: Haddelemede kısıtlı akış bölgeleri	42
Şekil 4.15	: Kısıtlı akış bölgelerinin üst üste binmesi	43
Şekil 4.16	: Kauçuk diyafram içinde bir şekillendirme işleminde 5457 H0 alaşımlı otomobil arka stop lambasının yatağının yapımı	44
Şekil 4.17	: Süperplastik şekillendirme için üfleyerek şekillendirme tekniğinin şematik gösterilişi	45
Şekil 4.18	: ΔR'ye bağlı olarak kulak oluşumu	49
Şekil 4.19	: Derin çekme işleminde karşılaşılan hatalara ait örnekler	52
Şekil 4.20	: Çelik, 1100 alüminyum ve 70/30 pirinç için düzlemde germede sınır deformasyonlar	53
Şekil 4.21	: Şekillendirme boşluğu ilkesine göre tahmini şekillendirme sınır eğrisi	54
Şekil 4.22	: Otomotiv sektöründe kullanılan SPRC35-R yüksek mukavemetli çeliğin şekillendirme sınır diyagramı	55
Şekil 4.23	: 2,28 mm kalınlıklı ETİAL-52 levha malzeme için belirlenen şekillendirme diyagramı	58

Şekil 4.24 : 2036-T4, 5085-0 ve 5182-0 Alüminyum alaşımları kubbe yüksekliği/Zımba yarıçapı – min.deformasyon oranı eğrisi..... 58
Şekil 4.25 : 5052 ve 5182 alüminyum alaşımların yeniden kristalleşme davranışları..... 59
Şekil 4.26 : Fotokimyasal dağlama ile grid oluşturma..... 60
Şekil 4.27 : Elektrokimyasal dağlama ile grid oluşturma..... 61
Şekil 4.28 : Ağ yapısı örnekleri..... 62
Şekil 4.29 : Yassı metal şekillendirme sonrası ağ yapıları..... 63
Şekil 4.30 : a) Elipslerin ölçümü için Myler cetveli, b) Kamera ile otomatik ağ yapısı ölçüm düzeneği..... 63
Şekil 4.31 : Şekillendirme sonrası oluşan elips formları ve dikkate alınması gereken eksenler..... 64
Şekil 4.32 : İzotrop malzemeler için şekillendirme kararsızlık seviyeleri..... 66
Şekil 5.1 : Hidrostatik şişirme kalıbı düzeneği..... 70
Şekil 5.2 : Hazırlanan hidrostatik şişirme test düzeneği ve yağlama yuvası.. 70
Şekil 5.3 : Hidrostatik şişirme testinde kullanılan kalıp fotoğrafları..... 71
Şekil 5.4 : Döküm yönüne paralel hazırlanmış döküm numunelerin makro fotoğrafları (10X); a) 5052, b) 5182..... 72
Şekil 5.5 : Döküm yapısının MHS kesit görünümü..... 73
Şekil 5.6 : Döküm numunelerinin tane yapısı (10X); a) 5052, b) 5182..... 74
Şekil 5.7 : Döküm yapısının 450 / 8 sa homojen tavlanması sonucu elde edilen tane yapısı; a) 5052, b) 5182..... 75
Şekil 5.8 : 1 mm kalınlığında 5052 alaşımının 350 / 4 sa tavlanması sonucu elde edilen tane yapısı..... 76
Şekil 5.9 : 1 mm kalınlığında 5182 alaşımının 410 / 4 sa tavlanması sonucu elde edilen tane yapısı..... 76
Şekil 5.10 : Değişik yönlerde hazırlanan çekme testi numunesi..... 77
Şekil 5.11 : 5052-5182 Genel Mukavemet-%Uzama Eğrileri..... 78
Şekil 5.12 : 1 mm kalınlık H0 kondüsyonundaki ikiz merdane tekniği ile dökülmüş 5052-5182 alüminyum alaşımlarının ve klasik döküm yöntemi ile dökülmüş 5182-5754 DC alüminyum alaşımlarının anizotropi özelliklerinin karşılaştırması..... 82
Şekil 5.13 : a) Çekme Testi Numune Taslağı, b) Yüzeyi elektrodağlama ile birbirini kesen dairesel ağ dokusu yüzeyli çekme numunesi..... 84
Şekil 5.14 : Hidrolik Şişirme sonucu oluşan çatlama; kalıp 100 : 100 mm..... 85
Şekil 5.15 : Hidrolik Şişirme sonucu oluşan çatlama; kalıp 70 : 100 mm..... 86
Şekil 5.16 : 5052 Şekillendirme Sınır Diyagramı..... 87
Şekil 5.17 : 5182 Şekillendirme Sınır Diyagramı..... 87
Şekil 5.18 : TRC ile üretilen 5052 ve 5182 alüminyum alaşımlarının Şekillendirme Sınır Diyagramlarının karşılaştırılması..... 88
Şekil 5.19 : 5182-TRC ve 5182-DC [30] ile üretilen alüminyum alaşımlarının Şekillendirme Sınır Diyagramları..... 89
Şekil 5.20 : SEM ile çekilmiş 5052 kırılma yüzeyi..... 90
Şekil 5.21 : SEM ile çekilmiş 5052 açılı kırılma yüzeyi..... 90
Şekil 5.22 : 5182 alaşımlı malzemenin hadde yönüne dik kırılma yüzeyi..... 91
Şekil 5.23 : 5182 alaşımlı malzemenin hadde yönüne paralel kırılma yüzeyi. 91
Şekil 5.24 : 5182 alaşımlı malzemenin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri..... 92
Şekil 5.25 : 5182 kırılma yüzeyinde çizgisel element analizi-1..... 93
Şekil 5.26 : 5182 kırılma yüzeyinde çizgisel element analizi-2..... 94
Şekil 5.27 : Alaşımlı malzemenin kırılma yüzeyinde elementel dağılım haritası..... 95

SEMBOL LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Si	: Silisyum
Zn	: Çinko
Mn	: Mangan
Be	: Berilyum
Ti	: Titanyum
μ	: Mikron
^{0}C	: Derece Celcius
Tm	: Ergime Sıcaklığı
dak	: Dakika
sa, h	: Saat
Mak.B.Ş.D.	: Maksimum Birim Şekil Değiştirme
Min.B.Ş.D.	: Minimum Birim Şekil Değiştirme
kV	: Kilovolt
$\sigma_ç$	: Çekme Mukavemeti
σ_a	: Akma Mukavemeti
% e	: % Mühendislik Uzama
n	: Deformasyon sertleşmesi üssü
R	: Anizotropi Katsayısı
ΔR	: Düzlemsel Anizotropi Katsayısı
$\overline{R}$	: Ortalama Dikey Anizotropi Katsayısı
K	: Malzeme Mukavemet Katsayısı
R_0	: Hadde yönündeki anizotropi katsayısı
R_{45}	: Hadde yönüne 45 ^{0} yönündeki anizotropi katsayısı
R_{90}	: Hadde yönüne 90 ^{0} yönündeki anizotropi katsayısı

ALÜMİNYUM SÜREKLİ DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ 5052 – 5182 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK KABİLİYETLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Yassı metal alüminyum endüstrisinde kullanılan en önemli yarı mamul ürünlerinden bir tanesi olup yassı metal sac şekillendirme teknolojisi de bu sayede büyük önem kazanmıştır. Alüminyum sürekli döküm yöntemiyle yassı levhalar daha düşük kalınlıklarda üretilmekte, bu sayede maliyette ve zamandan tasarruf elde edilmektedir.

Hunter Twin Roll Caster (TRC), su soğutmalı merdaneler arasına döküm yapmak suretiyle dökme demirdışı levha üretmektedir. Bu teknoloji Fata-Hunter ve diğer firmalar tarafından sürekli geliştirilmektedir. Twin-roll casting teknolojisi direkt olarak eriyik metalden 2 – 10 mm arasındaki kalınlıklarda yassı alüminyum üretilmesine olanak sağlar. İkiz merdane döküm makinaları genellikle 5 mm kalınlığında levha üretirler ve kullanılan döküm alaşımları dar bir katılaşma aralığına sahiptir. Özellikle alaşım, döküm kalınlığı ve hız, tip mesafesi gibi dökme levha kalitesi üzerinde etkilidir.

Çalışmada alüminyum sürekli döküm yöntemiyle, 5 mm civarında dökülerek 1 mm kalınlığa endüstriyel ortamda soğuk haddelenerek tavlanan yüksek magnezyumlu 5052 – 5182 alaşımlarının şekillendirilebilirlik özellikleri incelenmiştir.

Her iki alaşımında döküm kalınlıklarında homojen tav öncesi ve sonrası mikroyapılarını tespit edebilmek için döküm yönünde numuneler hazırlanmıştır. Uygulanan proses sonrası 0, 45, 90 ^{0} açılı çekme numuneleri hazırlanarak σç, σa, % e, n, r, ΔR ve $\overline{R}$ değerleri bulunmuştur. Erichsen test düzeneği yardımıyla derin çekilebilirliğin bir ölçüsü olan Erichsen değerleri tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyler incelemeleri için çekme sonrası kopan numunelerin kırılma yüzeyleri SEM'de, inklüzyon analizleri ise EDS analizleri ile gözlemlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; 5182 (%4,4 Mg) alaşımı, 5052 (%2,6 Mg) alaşımına göre daha yüksek mukavemet, Erichsen, $\bar{R}$ ve n değerleri göstermiştir. Düzlemsel anizotropi özelliklerine göre, 5182 alaşımlı malzemenin 45^0 yönlerinde kulaklanma göstereceği, 5052 alaşımının ise neredeyse hiç kulaklanma davranışı göstermeyeceği tespit edilmiştir. Süneklik açısından bakıldığında, iki alaşım arasında çok büyük bir fark tespit edilememiştir.

Döküm mikroyapıları incelendiğinde; her iki yapıda da merkez hattı segregasyonuna rastlanmıştır. Homojen tavlanan numunelerin kesit yüzeylerinde, dış yüzeylerde ince tane yapısı, iç bölgelere doğru daha kaba tane yapısına rastlanmıştır. Her iki alaşımında döküm tane yapıları hemen hemen aynıdır.

Yapılan çekme deneylerinde her iki alaşımda da plastik deformasyon sırasında dinamik deformasyon yaşlanması görülmüştür. Bu olay, Portevin-LeChatelier etkisi olarak bilinen, çökelti atomlarıyla dislokasyonların etkileşiminden kaynaklanmaktadır.

Hidrolik şişirme ve çentik çekme testleri ile oluşturulan Şekillendirme Sınır Diyagramlarında, 5182 alaşımlı malzemenin şekillendirme sınır çizgisinin 5052 alaşımlı malzemenin şekillendirme sınır çizgisinden daha yukarıda olduğu tespit edilmiştir.

Her iki alaşımın çekme numuneleri kırılma yüzeyleri incelendiğinde, sünek kırılmanın bir göstergesi olan oyuklu kırılma yüzeylerine rastlanmıştır. 5182 alaşımına yapılan çizgisel elementel analizde Al-Fe-Mg-Si inklüzyonlarına rastlanmıştır.

Sonuç olarak; Twin-roll casting metoduyla üretilen 5182 alüminyum alaşımının 5052 alaşımına göre daha iyi şekillenebilirlik özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

DETERMINATION OF FORMABILITY BEHAVIOURS OF 5052 AND 5182 ALUMINIUM ALLOYS PRODUCED BY CONTINUOUS CASTING METHOD

SUMMARY

Sheet metal is one of the most important semi-finished products used in aluminum industry and sheet metal forming technology is therefore in important engineering discipline. By using strip casting method, aluminum sheets can be produced thicker, less time and cost.

Non-ferrous sheet metal can be casted between two water-cooled roll system which name is Hunter Twin Roll Caster (TRC). Fata-Hunter and the other companies improve its capabilities from day by day .Twin roll casting can be used to produce aluminum sheet from 2 to 10 mm in thickness. Twin-roll casters generally limited to aluminum sheet about 5 mm thickness and the casting alloys with narrow solidification ranges. Sheet metal quality can be affected by alloy composition, casting thickness, speed and tip distance.

In this study, two different types of 5xxx quality aluminum alloys (5052-5182) were produced by twin roll casting method in the thickness of approximately 5 mm. After casting operation, materials were cold rolled to 1 mm thickness and homogenised at final gauge. The formability of 5052 – 5182 quality aluminum alloys produced by continuous casting method was investigated. 5xxx series Al-Mg alloys are strain hardenable and have moderately high strength, corrosion resistance even at salt water and very high toughness.

For microstructural analysis, samples were prepared from longitudinal direction to understanding homogenisation behaviour at casting thickness. After processing the tensile test samples prepared from three different directions (0, 45, 90 ^{0}) used to determine the mechanical properties (σç, σa, % e, n, R, ΔR ve $\bar{R}$ values). Erichsen

test was used to understand deep drawing behaviours. By using SEM and EDS, the fracture surface of the tensile specimens were examined.

From the mechanical test results, it was determined that 5182 quality aluminium alloy has higher strength, Erichsen, normal anisotrophy and strain hardening exponent (n) values than 5052 quality aluminium alloy. From the planar anisotrophy values, it was also determined that 5052 quality aluminium alloy has approximately no earing behaviour, whereas 5182 aluminium alloy has earing behaviour at the direction of 450. At the tensile tests of the both aluminium alloys the dynamic strain aging behaviour was observed. The ductility values of these two alloys were close each other. At the metallographic examinations, it was observed that these two aluminium alloys have center-line segregation. At the same time, after homogenisation of cast microstructures, the grain structures changed from surface as fine grains toward to center as coarse grains. Scanning electron microscope examinations of the fracture surfaces of the tensile specimens of both alloys showed ductile fracture characteristics such as dimpled fracture surfaces.

Forming limit diagrams of these two aluminium alloys were obtained from hydraulic bulge and notched tensile tests to compare formability behaviours. It is found that 5182 aluminium alloy has better formability than 5052 aluminium alloy.

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun varoluşundan beri üstüne bastığı topraklarda yatan beyaz altın, 1807 yılında Sir Humpherey Davy'nin alüminada oksijene bağlı bir metalin varlığını tahmin etmesi ile alüminyum adı altında tarihteki yerini almıştır.

İlk olarak 1825 yılında 1. Paris Dünya Sergisi'nde Fransız araştırmacı Henry Sainte-Clarie Deville tarafından insanların önüne sunulmuştur. Bunun sonucunda, 3.Napolyon'un maddi desteği ile endüstriyel alüminyumun kazanılmasına temel adımlar atılmıştır. Gösteriyi ve ihtişamı çok seven 3. Napolyon sarayında konuklarını o zamanlar altından daha değerli alüminyum yemek takımları ile ağırlamaktaydı [1].

Alüminyumun cevherden folyoya olan serüveni çok kısa bir sürede gelişerek günümüzde çok kullanılır hale gelmiştir. Tüketimde, alüminyum ve alaşımlarının demir-çelik ile mukayese edilecek duruma gelmesi, son yıllarda elektrik, kimya, tıp, inşaat ve otomotiv sanayinde ve bunların yan kollarında har geçen gün artan bir şekilde kullanılması, bu metalin önemini gün geçtikçe artırmaktadır. Hafif metal sınıfından olan alüminyumun bu önemi yumuşak ve demirden üç kat daha hafif, mukavemetin ağırlığına oranının yüksek olması, yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması, kolay işlenebilirliği, korozyona dayanıklılığı, dekoratifliği, soğuk ve sıcak olarak şekillendirilebilirliği, talaşlı ve talaşsız olarak işlenebilirliği gibi özelliklere sahip olmasındandır.

Alüminyum endüstrisi geçtiğimiz 100 yıl içerisinde sınırlı sayıda alaşım ve üründen çok geniş bir ürün yelpazesine sahip büyük hacimli üretim miktarlarına gelişim göstermiştir. Günümüzde A.B.D. alüminyum üretiminin 5,6 milyon tonu düz hadde ürünü, 1,7 milyon tonu ekstrüzyon ve 2,4 milyon tonu ingot üretimi içermektedir. Dünyanın süper gücü olarak nitelendirilen A.B.D. bu gelişim çerçevesinde alüminyum geri dönüşümüne de lokomotif olmuştur [2].

İşlenerek oluşturulan alüminyumun ürünleri, kısa veya uzun bir faydalanma döneminden sonra, yani kullanılamaz hale geldiklerinde dahi ekonomik değer

taşımaktadırlar. Bu sayede kazanılan aktivite kola kutularının, konserve kutularının, tüplerin, çatıların, kaportaların, uçak gövdelerinin, kapı gövdelerinin,...v.b. değişik kullanım alanlarına sahip alüminyum alaşımlarının geri kazanılabilmesi ve tekrar üretilebilmesi sağlanmaktadır. İşte bu noktada ikincil alüminyum üretimi büyük önem kazanmaktadır. Bu kolun da en büyük lokomotifi alüminyum sürekli döküm makineleri olmuştur.

Çalışmada kullanılan alüminyum levhaların üretildiği Twin-roll casting (TRC) teknolojisi, direkt olarak sıvı metalden yaklaşık olarak düzgün profilli 2 – 10 mm kalınlığında alüminyum levha üretilebilmesini olanak sağlar. Ticari TRC metoduyla döküm yapan döküm makineleri 6 mm kalınlık civarında üretim yapar. Bu yöntemde kullanılan döküm alaşımları dar katılaşma aralığına sahip olmalıdır. İnce döküm teknolojisi çok yeni bir metot olduğundan, sürekli olarak levha dökümünde sorunlar yaşanabilmektedir. TRC prosesiyle başarılı bir alüminyum levha üretiminde amaç; düşük maliyetli, üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip sürekli yassı levha üretim prosesini geliştirmektir [3,4].

Bu çalışmanın amacı, TRC prosesiyle üretilmiş 5052 ve 5182 alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik kabiliyetlerini belirlemek için Şekillendirme Sınır Diyagramları'nı (Ş.S.D.) oluşturmaktır.

2. ALÜMİNYUM TARİHÇESİ, GENEL ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİMİ

2.1. Alüminyum Tarihçesi

Alüminyum, yüzyılı aşkın tarihi ve teknik özelliklerinin getirdiği üstünlükler nedeniyle dünyada ve ülkemizde giderek daha çok kullanılır hale gelmiştir. Tüketimde, alüminyum ve alaşımlarının demir-çelik ile mukayese edilecek duruma gelmesi, son yıllarda elektrik, kimya, tıp, uçak, inşaat ve otomotiv sanayinde ve bunların yan kollarında har geçen gün artan bir şekilde kullanılması, alüminyumun önemini günden güne artırmaktadır.

1807 yılında Sir Humpherey Davy alüminada oksijene bağlı bir metalin varlığını tahmin etmiştir. Alüminanın elektrolizinde demir katod kullanıldığı için demir-alüminyum alaşımı elde etmiş, alüminyumu ayıramamıştır. 1821 yılında M.Pierre Berthier Güney Fransa'da Les Baux kasabasında boksit madenini bulmuştur. 1825 yılında Danimarkalı fizikçi Christian Oersted , alüminyumu susuz alüminyum klorürden kalsiyum amalgamı ile redükleyerek ilk metalik alüminyumu üretmiştir [1].

1850 – 1860 yılları arasında Fransız araştırıcı Henry Sainte-Clarie Deville 3.Napolyon'un maddi desteği ile endüstriyel alüminyumun kazanılmasına temel adımları atmıştır. 200 ton alüminyum üreterek alüminyumun fiyatını 2400 DM'den 25 DM'ye düşürmüştür. 1855 yılında, Deville tarafından ilk olarak üretilen alüminyum Paris'te bir fuarda teşhir edilmiştir.

1886 modern alüminyum endüstrisinin doğum yılı olmuştur. Fransa'da Paul T. Héroult ve Amerika'da Charles Martin Hall birbirlerinden bağımsız olarak kriyolitte çözünmüş alüminanın elektrolitik parçalanması ile ilgili patent almışlardır. Günümüzde bütün cevherden alüminyum üreten tesisler bu patente göre üretim yapmaktadırlar. 1887-1988 yıllarında Héroult İsviçre firması Metallurgischen Gesellschaft ilk elektroliz tesisini kurmuştur. Daha sonra bu firma Alman Edison Gesellschaft (daha sonra AEG) firması ile birleşmiştir. 1887 – 1892 tarihleri arasında K.J.Bayer kendi ismi ile anılan Bayer prosesinde

(alümina üretimi) ilk patenti almıştır. Alüminyum boksit cevherlerinden üretiminin geliştirilmesinden sonra alüminyum hızla endüstride kullanılmaya başlanmıştır.

Alüminyumun başlıca ilk gelişim adımları;

1889 : Mutfak eşyalarında kullanımı (tencere ve tabak),

1891 : Gemi İnşaatında kullanımı (yatlarda),

1892 : Havacılık Sektöründe kullanımı,

1893 : Sanat Eserlerinde kullanımı,

1890 : Alüminyumun Sert Lehimi,

1905 : Alüminyum dökümden ticari motor üretimi,

1906 : Yüksek mukavemetli sertleşebilir Duralümin (Al-Cu-Mg) keşfi,

1909 : Bira kutularında kullanımı,

1910 : Bant haddeleme ile folyo üretimi,

1918 : Sertleşebilir korozyona karşı Al-Mg-Si alaşımlarının geliştirilmesi,

1919 : Konserve kutularında kullanımı,

1920 : Alüminyum boruların büyük ölçekte kullanılması,

1928 : İlk alüminyum tank (30,3 m^3'lük) imalatı,

1931 : Süt kapaklarında kullanımı

1933 : Köprü İnşaatında kullanılması

1951 : Almanya'da yaya köprüsü (6 t) inşaatı.

1960 – 2000 : Motor blokları, otomotiv jantları, cephe giydirme, diş macunu tüpleri, televizyon kuleleri, roket komponentleri, gaz taşıma üniteleri, doğalgaz sıvılaştırma üniteleri, zırh plakaları, ...v.b. imali.

2.2. Alüminyum Genel Özellikleri

Alüminyum ve alaşımlarının sağladığı üstün özellikler sebebiyle, tüketimleri büyük bir hızla artmakta ve her geçen gün yeni kullanım alanları açılmaktadır. Saf alüminyum galvanik seride çok aktif bir metal olmasına karşın, yüzeyinde kolaylıkla oluşan koruyucu oksit tabakası onun yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan bu geçirimsiz, sert ve koruyucu oksit tabakası alüminyumun korozyon direncini önemli ölçüde arttırır. Buna bağlı olarak alüminyum saflaştırıldıkça korozyon direnci ve iletkenliği artar. Bu nedenle, korozyona karşı oldukça hassas olan alüminyum alaşımları günümüzde saf alüminyum giydirilmesi yoluyla korozyondan korunmaktadır. Diğer yandan saf alüminyum oldukça düşük olan mukavemeti soğuk işlemle arttırılabilmektedir.

Bugün alüminyum ve alaşımları sahip olduğu özellikleri itibariyle endüstride kullanılan en önemli yapı ve mühendislik malzemelerinden birisi halini almıştır. Saf halde yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, korozyon direnci gibi özelliklere sahipken, alaşımlama ile bu özellikler çok daha geniş bir spektruma yayılarak yaygın bir kullanım alanına sahip olmuştur. Bugün endüstride geniş çaplı olarak 100' ün üstünde alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. En önemli özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Hafifliği : Saf alüminyumun özgül ağırlığı yaklaşık 2.7 gr/cm^3'tür. Kütlesi demirin %35'i, bakırın ise %9'u kadardır. Bu düşük ağırlık özelliği başta uçak ve otomobil endüstrisinde olmak üzere, tüm taşımacılık sanayinde önemli bir rol oynamaktadır.

- Mekanik özellikler : Çeşitli alüminyum alaşımlarının ısıl işlemleri sonucu, istenilen şekilde mukavemet, tokluk, sertlik ve diğer mekanik özellikler geliştirilebilir. Özellikle küçük miktarlarda Mn, Mg, Si, Cu, Zn, Ti ilavesiyle mukavemeti daha da arttırılan alüminyum alaşımlarında, ısıl işlem ile bugün çok yüksek çekme mukavemeti değerlerine ulaşılmıştır.

Alüminyumun mekanik özellikleri arasında en önemli olan elastisite modülüdür. Alüminyumun elastisite modül değeri, çeliğin elastisite modülünün 1/3'üne eşit olduğundan, çelik yerine alüminyum kullanılmaya karar verildiğinde, esnemenin çeliğe göre 3 kat daha fazla olacağı göz önüne alınmalıdır. Alüminyumun sertliği 19-20 BHN değerinde olmakla birlikte, alaşımlarında ise 120 BHN değerine kadar

çıkabilmektedir. Çekme dayanımı ise 90 MPa değerinden, bazı yaşlanabilir alaşımlarında 650 MPa değerine kadar ulaşabilmektedir. Alüminyumun bazı fiziksel ve mekaniksel özellikleri, diğer metallerle karşılaştırmalı olarak Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Alüminyumun fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırılması [5]

Özellik	Al	Fe	Cu	Zn	Mg
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,70	7,87	8,94	7,10	1,74
Isıl İletkenlik ($cal/cm^2/cm\ ^0C$)	0,52	0,19	0,92	0,27	0,37
Isıl Genleşme ($mm/mm\ ^0C).10^{-6}$	24,0	11,9	16,7	33,0	25,7
Ergime Sıcaklığı (^0C)	660	1585	1083	420	651
Uzama (%)	43	48	50		
Sertlik (BHN)	19	70	25		

- Korozif Özellikler : Alüminyum yaygın olarak kullanım nedenlerinden biri de onun yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Bu özelliği sebebiyle, kimya ve besin sanayinden, inşaat sanayine ve ev eşyalarına kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır. Alüminyum yüzeyler, atmosferik korozyona maruz kaldığında, çok ince (20-25 A°) görünmez bir oksit tabakası oluşur ve bu tabaka daha fazla oksitlenmeyi önler. Alüminyumun bu özelliği yüksek korozyon direncinin temel nedeni olup, birçok aside karşıda aynı direnci göstermektedir. Ancak bazı alkaliler bu oksit tabakasını tahrip etme özelliğine sahiptir. Elektrolitik ortamlarda bazı metallerle doğrudan temas etmesi sonucunda galvanik korozyon olabilir. Bu durumda boya ya da yalıtkan bant uygulaması yapılmalıdır.

- Toksilojik reaksiyonlara girmemesi : Zehirleyici olmama özelliği, gıda endüstrisinde ya da mutfak malzemelerinde yaygın kullanım alanı bulmasına yol açmıştır. Bu özelliği sayesinde yiyecek ve ilaç ambalajlanmasında, sigara, çay paketlenmesinde geniş çaplı olarak kullanılır.

- Isı ve elektrik iletkenliği : Alüminyum ve alaşımları ısı ve elektriği oldukça iyi iletirler. Yüksek ısıl iletkenliği (çeliğin 6 katı), ısıtma/soğutma endüstrilerinde, gıda, kimya, petrol, havacılık sektörlerinde alüminyum ısı değiştiricilerinin yaygın olarak kullanımına yol açmıştır. Ticari alüminyum elektrik iletkenliği 37 siemens civarındadır. Elektriksel iletkenliği bakırın %62'si mertebesindedir. Bakırın

yoğunluğu 8.9, alüminyumun ise 2.7 gr/cm3 olduğu düşünülürse; ağırlıkça kıyaslandığında alüminyumun bakırdan daha iyi iletken olduğu ortaya çıkar.

- Yüksek ısı ve ışık yansıtması : %80'in üzerinde ışık yansıtma özelliği ile aydınlatmada, yüksek ısı yansıtma özelliği dolayısıyla da çatı kaplamalarında kullanılmaktadır. Bu özelliğin dolayı ışık reflektörlerinin kaplanmasında ve aynaların geri yansıtıcılığında kullanılırlar.

- Metalotermik reaksiyonlarda kullanımı : Alüminyum oksijene olan ilgisinden dolayı, diğer metallerin oksitlerini redükler. Bu özelliği nedeniyle toz alüminyum krom, vanadyum, baryum ve lityum gibi metal oksitleri redükleyerek bu metallerin üretiminde kullanılır.

- Kolay şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliği : Kolayca dökülebilir, kağıttan daha ince şekilde haddelenebilir (folyo), çekilebilir (tel, ekstrüzyon ürünleri, profil), dövülebilir. Alüminyum kolayca ve hızlı bir şekilde tornalama, frezeleme, delme operasyonlarına tabi tutulabilir.

- Kaynaklanabilirliği : Her türlü birleştirme yöntemi uygulanabilir (kaynak, perçinleme). Ayrıca havacılık ve otomotiv sektöründe yapıştırma uygulamaları da yaygındır.

- Çok geniş spektrumda yüzey işlemlerine tabi tutulması : Koruyucu bir kaplama gerektirmeyen durumlarda mekanik yüzey işlemleri olarak parlatma, kumlama veya fırçalama birçok durumda yeterlidir. Koruyucu kaplama olarak, kimyasal, elektrokimyasal boya uygulamaları ile eloksal ve elektrokaplamalar uygulanabilir. Uygulamaların büyük çoğunluğunda yukarıda belirtilen özelliklerden iki yada daha fazlası bir araya gelerek belirleyici rol oynar. Örneğin, hafifliği ve mukavemeti uçak sanayinde, raylı sistem taşımacılık ekipmanlarında; korozyon direnci ve ısıl iletkenliği kimya ve petrol sanayinde, bu özelliklerine ilaveten zehirli olamama özelliği ile, albenili görünümü, atmosferik koşullara dayanımı ve düşük bakım maliyetleriyle inşaat sektöründe yüksek yansıtma, mükemmel atmosferik direnç ve hafifliği ile çatı kaplamalarında yaygın kullanım alanı bulmasını sağlamıştır.

- Düşük maliyet : Alüminyumun ekonomik yönden avantajı diğer metallere göre büyük bir hızla yükselmektedir. Bunun başlıca nedeni birim ünitesinin maliyetinin diğer metallere göre daha ekonomik olmasıdır. Alüminyumun diğer metallere

göre daha hafif olması dökümde büyük bir avantaj sağlar. Aynı boyuttaki diğer metallere göre daha fazla döküm yapabilmek mümkündür. Ayrıca çok yüksek olmayan ergime sıcaklığı, döküm sırasında daha az enerji harcanması ve kalıp aşındırması sebebiyle önemli bir tercih nedenidir.

Bütün bu özellikler göz önüne alındığında alüminyum kullanım yerleri ve alternatif olduğu malzemeler Tablo 2.2'de gösterilmiştir [6].

Tablo 2.2. Alüminyumun alternatif olduğu malzeme ve kullanım alanları [6]

Sektör	Önemli kulanım yerleri	Alternatif olduğu malzeme
Ulaşım	Radyatörler Motor parçaları Kaporta	Bakır/pirinç Dökme demir Siyah galvanizli veya kaplamalı saçlar
Uçak/Uzay	Yapı elemanları Uçak gövdesi	Çelik/plastik/magnezyum Karbon elyaflı veya kompozit malzemeler
Trenler	Yolcu ve yük vagonları	Çelik
Deniz araçları	Tekne gövdesi	Ağaç/cam elyafı/çelik
İnşaat	Duvar kaplama Çatı kaplama	Ağaç/çelik/plastik Ağaç/galvanizli çelik/Pb plaka
Ambalaj	Meşrubat kutuları Konserve kutuları Aerosol kutuları Folyo Kapaklar	Teneke/plastik/cam/kompozitler Teneke/cam Teneke Plastik/kağıt Plastik/teneke
Elektrik	İletkenler Baralar Transformatör ve jeneratör Telefon kablosu	Bakır
Makine	Yataklar Isı eşanjörleri Hidrolik sistemler	Döküm malzemeler Bakır/paslanmaz çelik
Dayanıklı Tüketim malları	Buzdolabı Klimalar	Özel çelikler/bakır/plastik Özel çelikler/plastik/bakır
Diğer uygulama	Sulama boruları Ziraat aletleri Kimyasal tesisler	Dökme demir/çelik/plastik Çelik Paslanmaz çelik

Alüminyum içerdiği alaşım elementlerine göre AA standardında aşağıdaki Tablo 2.3'de gösterildiği gibi adlandırılmaktadır:

Tablo 2.3. Alüminyum ve alaşımlarının AA standardına göre gösteriliş biçimleri [7]

1XXX	min. 99% saflıkta alüminyum	**5XXX**	Al-Mg Alaşımı
2XXX	Al-Cu Alaşımı	**6XXX**	Al-Mg-Si Alaşımı
3XXX	Al-Mn Alaşımı	**7XXX**	Al-Zn-Mg Alaşımı
4XXX	Al-Si Alaşımı	**8XXX**	Çeşitli Alaşımlar, Örn; Al-Li Alaşımları

2.3. Alüminyum Üretimi

Bir yüzyıldan kısa bir zamanda alüminyum hem üretim hem de kullanım açısından dikkate değer bir gelişme göstermiş ve günümüz endüstrisi için önem açısından çelikten sonra ikinci sırayı almıştır. Alüminyum üretimi; primer (birincil) ve secondary (ikincil) alüminyum üretimi olarak iki bölümde gelişme göstermiştir.

Alüminyum, yeryüzünün bileşiminde oksijen (% 47,3) ve silisyumdan (% 27,7) sonra en çok bulunan üçüncü element olarak dünya kabuğunun yaklaşık % 8'ini teşkil etmektedir. Alüminyumun oksijene karşı afinitesinin yüksekliği sebebiyle doğada saf halde bulunmaz. Bu nedenle alüminyum eldesi alüminyum silikat, demir oksit ve alüminyum silikat, demir oksit ve alüminyum oksitten oluşan boksit (bauxite) cevherinden yapılır. Boksit yeryüzünde oldukça geniş bir yayılım gösterir. Ancak en geniş kaynaklar tropik ve alt tropik kuşaklarda bulunmaktadır.

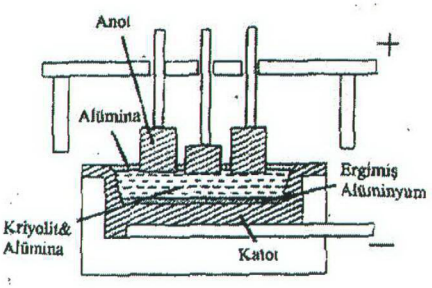
En önemli boksit kaynakları olarak günümüzde Avustralya, Jamaika, Guena, Endonezya, Brezilya, Çin ve Rusya'daki yataklar işlenmekte, alüminyum endüstrisinde kullanılan boksit cevherinin %80'i bu kaynaklardan gelmektedir.

Avrupa'daki önemli üreticiler Yunanistan, Yugoslavya, Fransa ve Macaristan olarak dünya toplam üretiminin yaklaşık %14'ünü oluşturmaktadır. Alüminyum, boksit içinde ve kaynağın bulunduğu bölgeye bağlı olarak, mono-hidrat oksit ($Al_2O_3H_2O$) veya tri-hidrat oksit ($Al_2O_33H_2O$) olarak bulunur. Avrupa boksitleri, Avustralya ve tropik bölgelerinden farklı olarak genellikle mono-hidrat tipindedir.

Boksit cevherlerinin en sık rastlanan mineralleri Diaspor, Böhmit, Hidrargilit gibsit örnek olarak verilebilir.

Alüminyum günümüzde hala ilk endüstriyel üretimin başlarında geliştirilen proses ile boksitten üretilmektedir. Bu metot iki farklı safhaya ayrılır; birincisi boksitten alümina üretimi için Bayer Prosesi, ikincisi ise bundan alüminyum üretimi için Hall-Heroult Prosesi' dir.

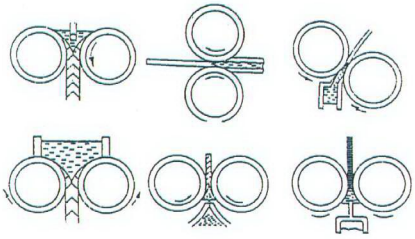
Günümüzde birincil alüminyum üretiminde yaygın olarak kullanılan boksit cevheri, yerküre yüzeyinin kazınması ile çıkartılır ve %5-30 arasında nem içerir. Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yanına kurulur. Madenden çıkarılan boksit cevheri, öncelikle kırılır, kurutulur ve sıvı kostik soda ile karıştırılıp otoklav adı verilen basınçlı tanklarla pompalanır. Bu tanklarda yüksek sıcaklık ve basınçta işleme tabi tutulur. Daha sonra takip edilen yol filtrasyon, çöktürme işlemleri sonucunda oluşan erimeyen kalıntılar (kırmız çamur) ayrılır ve döner fırınlarda alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile alümina (alüminyum oksit) elde edilir. Kalsinasyondan çıkan alümina (Al_2O_3) beyaz toz halinde elektrolizhaneye pompalanır. Beyaz bir toz görünümündeki hammadde olan alümina ile birlikte kok, zift karışımından oluşan anot pasta ve elektroliti oluşturan kriyolit (Na_3AlF_6) elektroliz işleminin yapılacağı hücreye yüklenir. Alüminanın yüksek ergime sıcaklığından (2000^0C'nin biraz üzerinde) kaynaklanan üretim güçlüğünü aşmak için; alümina ergitilmiş kriyolit ile karıştılarak Şekil 2.1'de gösterilen elektroliz hücrelerinde alüminyum redüksiyonu gerçekleştirir. Burada amaç, alüminyumu oksijenden ayırmaktır. DC akım uygulandığında, sıvı metal, astarı negatif kutup (katod) olarak oluşturulmuş fırının altında toplanır. Pozitif kutup (anod), ergimiş banyoya batırılan karbon bir bloktur (genelde Soderberg elektrodları) ve etrafında açığa çıkan oksijen tarafından yavaşça yakılır. Karbon, böyle yüksek sıcaklıklarda ergimiş banyo atağına ve hatta sıvı alüminyum atağına doğal olarak direnç gösterebilen tek iletkendir. Genel olarak ağırlıkça 4 ton boksitten, 2 ton alümina ve 2 ton alüminadan da, 1 ton alüminyum elde edilir.



Şekil 2.1. Alüminyum Elektroliz Hücresi [1,4,8]

Birincil alüminyum üretiminde en önemli faktör, yeteri kadar elektrik enerjisinin uygun maliyette temin edilmesidir. Alüminyum üretim teknolojisi geliştikçe, ilk zamanlarda üretilen birincil alüminyumun her tonu için 42.000 kwh olan enerji sarfiyatı, günümüzde ortalama 16.500 kwh değerine düşmüştür.Bu değer, en modern teknoloji ile çalışılan tesislerde 13.000 kwh/t değerlerine kadar düşürülmüştür.

Yukarıda sözü edilen işlemler ile elde edilen alüminyum birincil alüminyum (primary alüminium) olarak tanımlanır. Alüminyum daha sonra yarı ürün ve ürüne dönüştürülmek üzere, gerekiyorsa alaşımlandırılarak külçe (ingot), T-ingot, yassı ürün ingotu veya ekstrüzyon ingotu (billet) halinde dökülür. T-ingot ve slablar en alışılmış işlem formlarıdır ve genellikle bir yarı sürekli su soğutmalı döküm prosesiyle üretilir. Bu prosesler mikrokristalin tane boyutunu, optimum metalurjik özellikleri ve kimyasal kompozisyon homojenitesini sağlayacak hızlı soğuma etkisini sağlarlar. Aşağıdaki şemada birinci alüminyum üretim adımları özetlenmektedir.



Şekil 2.2. Alüminyum yarı-sürekli döküm teknikleri [9]

Şekil2.2 alüminyum ve alüminyum alaşımlı ingotlar için yarı-sürekli döküm tekniklerini göstermektedir. Yarı-sürekli döküm tekniğinin yanında sürekli döküm tekniği de mevcuttur. Genelde billet üretim sistemine adapte edilmiştir. Diğer sürekli döküm uygulamaları ise Hunter-Douglass, Hunter Eng., Hazelett, Pechiney ve Alussuisse döküm makinesi gibi birçok üretici firmalar tarafından yapılmıştır.

Elektroliz ile üretilen birincil metalden farklı olarak, ikincil alüminyum (ikincil ergitme) endüstrisinde "yeni hurda" olarak adlandırılan ve üretim işlemleri esnasında oluşan çeşitli atıkların yeniden ergitme yoluyla veya "eski hurda" olarak bilinen kullanım ömrünü yitirmiş alüminyum ürünlerinin yeniden değerlendirilmesi ile elde edilir. Alüminyum çok kolayca geri kazanılabilir ve bu özelliğinin yüksek verimlilikte ve iyi dizayn edilmiş proseslerle doğru işlenmesi diğer hafif metaller içerisinde önemli bir element olarak öne çıkmasını sağlamaktadır. Tablo 2.4'de görüldüğü gibi birincil alüminyum üretimine göre 1/20 oranında enerji gerektirmektedir.

Tablo 2.4. Bazı metallerin birincil ve ikincil üretimleri için termal enerji gereksinimleri [8]

	BİRİNCİL (kwh/ton)	İKİNCİL (kwh/ton)	KAZANÇ (kwh/ton)
TİTANYUM	126.000	52.000	74.000
MAGNEZYUM	90.000	2.000	88.000
DEMİR	4.300	1.000	3.300
BAKIR	13.500	1.700	11.800
ALÜMİNYUM	52.000	2.000	50.000

Dünyadaki birincil alüminyum yıllık üretimi 1920 yılında 200.000 ton iken, bugün 18 milyon tonlara doğru ilerlemektedir. Alüminyum en hızlı sıçrayışını 1950 – 1970 yılları arasında gerçekleştirmiştir. Bu hızlı çıkışın ardından ana endüstriyel pazarların doygunluğa ulaşmasının sebep olduğu dünya genelindeki ekonomik durum sebebiyle bu büyüme hızı düşmüştür.

1950 yılından 1990 yılına kadar Dünyadaki birincil alüminyum üretim miktarlarının kıta ve bölgelere göre dağılımı Tablo 2.5'de gösterilmektedir.

Tablo 2.5. Kıta ve bölgelere göre 1950 – 1990 yılları arasındaki birincil alüminyum üretimleri (1000 ton), [8].

YIL	1950	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
AVRUPA	246	3758	3724	3527	3585	3814	3641	3716	3750	3804	3913	3911
DOĞU ÜLKELERİ	219	3320	3276	3266	3309	3250	3309	3432	3530	3679	3650	3425
KUZEY AMERİKA	1012	5764	5648	4386	4484	5365	4825	4429	4947	5546	5656	5683
LATİN AMERİKA	-	776	744	756	906	1002	1121	1358	1440	1484	1626	1730
ASYA	30	1570	1319	1020	981	1184	1153	1066	950	1013	1135	1180
OKYANUSYA	-	460	535	548	695	998	1095	1113	1276	1407	1501	1492
AFRİKA	-	437	483	501	424	413	473	552	572	597	605	601
TOPLAM	**1507**	**16085**	**15729**	**14004**	**14384**	**16026**	**15617**	**15666**	**16465**	**17530**	**18086**	**18022**

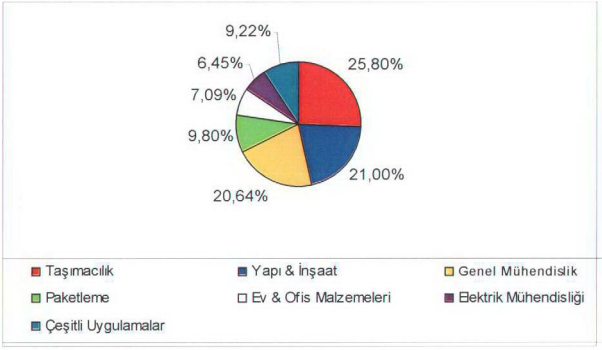
Yukarıdaki tablodan da görülebileceği gibi teknolojinin geliştiği bölgelerde üretim miktarları artış göstermiştir. İleriki yıllarda ekonomik ve endüstriyel gelişimlere paralel olarak miktar artışından ziyade yeni alaşımların kullanım alanlarının genişletilmesi sayesinde katma değer artışı daha büyük önem arz edecektir. Bu açıdan bakıldığında malzeme uzmanlarının 21.yy'da alüminyuma olan ilginin hafif yapısal malzemelere olan ilginin artmasına paralellik göstereceği konusunda birleşmektedirler [8]. Tablo 2.6'da 1950 – 1990 yılları arasında Avrupa ülkelerinden bazılarının birincil ve ikincil alüminyum üretim miktarları gösterilmektedir.

Tablo 2.6. Bazı Avrupa ülkelerinin 1950 – 1990 yılları arasındaki birincil ve ikincil alüminyum üretimleri (1000 ton) [8]

YIL	1950		1970		1980		1985		1990	
	1.CİL	2.CİL	1.CİL	2.CİL	1.CİL	2.CİL	1.CİL	2.CİL	1.CİL	2.CİL
B.ALMANYA	28	56	-	258	731	405	745	457	720	540
İNGİLTERE	30	81	-	201	374	150	275	122	290	201
İTALYA	37	15	-	154	271	266	224	282	232	350
HOLLANDA	-	1	-	7	258	54	245	83	272	145
FRANSA	61	24	-	87	432	170	293	170	326	215
İSPANYA	2	-	-	27	386	38	370	42	355	79

Birincil ve ikincil üretim sonrası, endüstrisi gelişmiş ülkelerde alüminyum ve alaşımlarının tüketimlerinin nihai kullanım alanına göre dağılımı Şekil 2.3'de gösterilmektedir. İnşaat, ulaşım ve genel mühendislik endüstrisi pastanın % 60'ını oluşturmaktadır. Geriye kalan % 40'lık dilimde de en önemli payı paketleme

(ambalaj) sektörü almaktadır.



Şekil 2.3. Endüstrisi gelişmiş ülkelerde alüminyum ve alaşımlarının tüketimlerinin nihai kulanım alanına göre dağılımı [8]

Eskiden beri süregelen değerlendirmelerde gelişmiş ülkeler değerlendirilirken GSMH'nın yanında kişi başına düşen çelik tüketimleri de değerlendirilmekteydi. Alüminyumun kullanım alanının gelişmesi ve kritik yerlerde kullanılmaya başlanmasıyla alüminyum tüketimi ve ulusal ekonomik gelişim arasında bir ilişki kurulmaya başlanmıştır. Tablo 2.7'de gelişmiş ekonomilere sahip bazı ülkelerin kişi başına düşen alüminyum tüketimleri gösterilmektedir. Gerekli incelemeler yapıldığında, teknolojinin beşiği sayılan ülkelerden A.B.D., Japonya ve B.Almanya kişi başına düşen alüminyum tüketim miktarları ile başı çektiği görülmektedir.

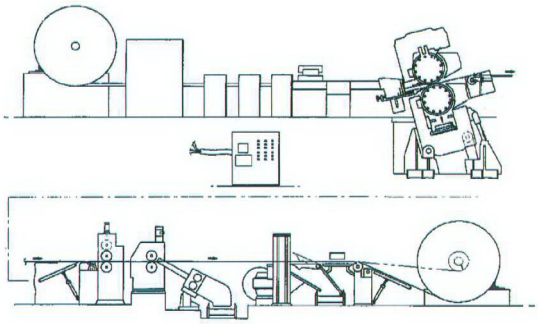
Tablo 2.7. Endüstrileşmiş ülkelerin 1950 – 1990 yılları arasındaki kişi başına alüminyum tüketimleri (kg), [8].

YIL	1960	1970	1980	1985	1990
JAPONYA	2	11,2	20,4	20,6	30,9
ALMANYA	7,2	13,7	22,0	23,8	30,1
A.B.D.	10,8	20,4	25,8	26,5	26,9
İTALYA	2,9	7,5	14,1	14,6	20,9
FRANSA	4,9	8,9	13,6	12,3	17,7
İNGİLTERE	7,8	11,1	9,2	10,5	11,1

3. LEVHA DOKÜM TEKNİĞİ

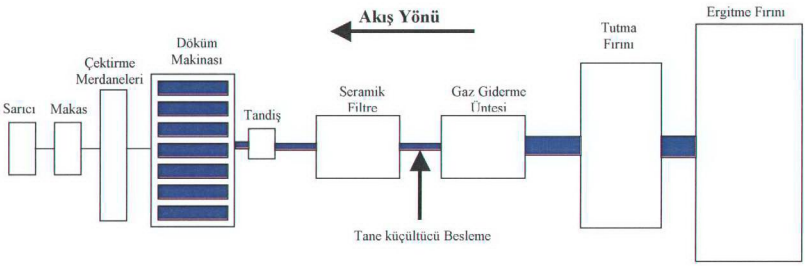
3.1. Genel Bilgi

Sürekli levha döküm tekniği ile alüminyum rulo üretimi alüminyum endüstrisinde standart uygulama haline gelmeye başlamıştır. Sürekli levha döküm tekniği ilk defa 1846 yılında Sir Henry Bessemer tarafından tasarlanmıştır. Sistemi desteklemesi gereken teknolojiler yeterli olamadığından, tekniğin uyandırdığı heyecan kısa sürmüştür. Bir asırdan daha kısa bir zamanda, gelişmekte olan ülkeler arasındaki rekabet daha şiddetli hale geldiğinde sürekli levha döküm teknolojisi endüstrileşmiş ülkeler tarafından yeniden keşfedilmiştir. Bu yöntemin ilk olarak ticari anlamda uygulanması 1950'li yıllarda Amerikan Hunter Engineering ve Fransız Pechiney şirketleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Günümüzde % 60'ı Kuzey Amerika ve Avrupa'da olmak üzere 180 kadar döküm makinesi üretim yapmaktadır. Şekil 3.1 de alüminyum endüstrisinde kullanılan tipik yerleşim görülmektedir.



Şekil 3.1. Twin-Roll Caster detay görüntüsü [10].

Şekil 3.2'de sürekli levha döküm tekniği ile üretim yapan tesislerin akış şeması verilmektedir.



Şekil 3.2. Tipik bir Sürekli Döküm Hattı Akış Şeması

Şekil 3.2' den de görüldüğü gibi hammadde (hurda+ingot+slab) sıvı metali oluşturmak için ergitme fırını beslenir. Ergitme fırını sıvı metal oluşturularak tutma fırınına transfer edilir. Ergitme ve tutma fırınlarında sıvı metal içerisine belirli elementler ilave etmek suretiyle alüminyum alaşımı hazırlanır. Alaşım hazırlama işleminde sıvı metalin bileşimi en önemlisidir. Metal sıvı haldeyken numune alınarak bileşim belirlenir ve alüminyum içerisindeki elementlerin çözünürlükleri dikkate alınarak master alaşımları şeklinde çözeltiye ilave edilir. Alüminyum içerisinde istenmeyen bileşikleri alabilmek için flaks kullanılır. Flakslar; inorganik özellikte olup gaz giderme, temizleme, oksidasyon, deoksidasyon, rafinasyon fonksiyonlarına sahiptir. Flaks kullanımının ana nedeni metalin ergimesi anında metal kayıplarını önlemek, gazların banyo tarafından absorbe edilmesine karşı koymak ve metali temizlemektir. Alüminyum alaşımlarında dört temel flaks türü vardır. Bunlar; örtü flaksları, temizleyici flakslar, metal geri kazanım flaskları ve rafinasyon flakslarıdır. Flakslar inert gaz taşıyıcısı kullanılarak mekanik bir cihaz ile ergimiş metalin içine verilirler.

Sıvı alüminyumu fırından döküm makinesine götürmek için refrakter yolluklar kullanılır. Refrakter malzemeden beklenen en önemli özellikler; düşük termal iletkenlik, iyi termal şok dayanımı, operasyon sıcaklığında boyutsal kararlılık, kalınlık boyunca yüksek mekanik mukavemet, mükemmel ıslatmama özelliği, kolay montaj için düşük ağırlık, ergimiş alüminyumdan daha düşük yoğunluk ve kolay temizlenebilirliktir [11].

Tutma fırınında yolluklarla sıvı metal ergimiş alüminyumdaki alkali safsızlıkları alabilmek için gaz giderme ünitesine gelir. Daha sonra metalik ve metalik olmayan inklüzyonlar seramik filtrelerde sıvı metalden uzaklaştırılır. Alüminyum alaşımındaki inklüzyonlar; oksitler (Al_2O_3, MgO), sipinel (Mg_2AlO_4), boritler (TiB_2,VB_2), karbürler (TiC,Al_3C_4), intermertalikler ($MnAl_3$,$FeAl_3$), nitritler (AlN) ve dış refrakter inklüzyonlarıdır. Seramik filtre yüzeyinde bir kek tabakası oluşarak 30 μm'den büyük partiküller yakalanır [12]. Temizlenen metal tandişe gelerek seviye kontrolu altında tip aracılığıyla döküm makinesine ulaşır.

Sürekli levha döküm tekniğinin hem ekonomik hem de metalurjik açıdan diğer yöntemlere nazaran getirdiği bazı avantajlar vardır. Söz konusu proses, katılaşmayı ve sıcak haddelemeyi tek bir operasyonla birleştirerek rulo ürettiğinden geleneksel rulo üretiminde gerek duyulan ilave bir sıcak haddeleme işlemine ya gerek kalmaz veya belirgin bir şekilde azalır. Sonuç olarak, enerji ve üretim maliyetleri azalır.

Sürekli levha döküm tekniği için gerekli yatırım maliyeti, geleneksel ingot-döküm sıcak haddeleme prosesi için gerekenden çok daha azdır. Metalurjik açıdan bakıldığında, prosesteki yüksek katılaşma hızı levhaların saf bir metalurjik mikroyapıya sahip olmasını sağlar. Oluşan mikroyapı; rafine dendritik hücreler (5μm civarında), ince intermetalik taneler (1μm boyutunda), katı çözünürlükteki artış ve yarı kararlı fazın varlığı ile karakterize edilir [9].

Sürekli levha döküm makinasının teorik olarak tahmin edilenden çok daha düşük hızda çalışması dezavantaj olarak görülebilir. Teorik üretim limiti 4.96 kg/sn.m iken, pratikte bu değer ortalama 0.248-0.372 kg/sn.m civarındadır. Bu üretim aralığı arasındaki farkı azaltmak için besleme sisteminin gelişmiş tasarımı, ara yüzeydeki ısı transferinin iyileştirilmesi, hadde kuvvetlerinin kontrolü gibi konularda araştırma yapılmaktadır [11].

Sürekli levha döküm tekniği katılaşma ve deformasyonun aynı anda ele alındığı bir yöntemdir. Rulo üretimi için mevcut diğer prosesler yalnız katılaşmayı içermekte, deformasyonu içermemektedir. Yalnız katılaşma teknikleri; yüksek verimlilik, alaşım kısıtlaması olmayışı, nispeten düşük katılaşma oranları ve yüzey hatalarına duyarlılık ile karakterize edilirler.

Sürekli levha döküm tekniğinde bazı alaşımlarda, belirli sıcaklık ve seviyedeki ergimiş alüminyum, döküm makinesinde tandişe gelmeden önce gaz giderme ve filtrasyon işlemlerine tabi tutulur. Tandiş, metali döküm makinesinin merdanelerine veren ve tip olarak bilinen nozula bağlıdır. Tip bir çeşit seramik malzemeden oluşmakta ve dökülen levhanın genişliğini oluşturmada bir kalıp görevi görmektedir. Ergimiş metal birbirine ters yönde dönen içten su soğutmalı iki merdane arasındaki boşluğa beslenir. Bu sebeple, levha sürekli döküm tekniği "İkiz Döküm Merdane Döküm Yöntemi" (Twin-Roll Casting – TRC) olarak da bilinir. Döküm merdanelerinin 15^0 açı yapması, tandişteki metal seviyesiyle ergimiş metalin tipten çıkış basıncının arasındaki dengenin ayarlanmasını sağlamaktadır. Bu özellik, metalin tip nozulundan döküm merdanelerine düzgün akışını sağlamaktadır. Döküm merdaneleri arasındaki mesafe hidrolik bir sistemle sabit tutulmaktadır. Tip çıkışıyla döküm merdanelerinin ekseni arasında belli bir mesafe vardır. Böyle bir proseste döküm merdaneleri, metali katılaştırmanın yanında belli oranda sıcak haddelemede yaparlar. Tip çıkışıyla döküm merdanelerinin ekseni arasındaki mesafeye 'tip ekseni' denir. Merdanelerin yüzeyine, levhanın merdanelere yapışmasını önlemek amacıyla sürekli olarak su bazlı grafit veya boron nitrat püskürtülür [13].

Döküm makinesinden çıktıktan sonra levha, rulo halinde sarılmadan önce gergi merdanelerinden ve makastan geçer. Normal operasyonda gergi merdaneleri çalıştırılmaz. Çünkü sarıcı dökülen levha üzerinde gerekli gergi kuvvetini oluşturur. Rulo istenilen boyuta geldiğinde gergi merdaneleri dökülen levha üzerinde gergi kuvveti oluşturmak amacıyla çalıştırılır, levha makasla kesilir ve operasyonun akışı etkilenmeden rulo sistemden alınır. Kesilen uç sarıcıya ulaştığında sarıcının yarattığı gergi kuvveti yeniden sağlanmış olur ve gergi merdaneleri durdurulur. Tablo 3.1' de sürekli levha döküm tekniği ile üretilebilen alüminyum alaşımları görülmektedir.

Sürekli levha döküm tekniğinin avantajları, iyi yüzey kalitesi, ince tane yapısı, uygun kalınlık ve profil dağılımı ve ilave sıcak haddeye gerek olmayışı olarak verilebilir. Dezavantajları ise; düşük verimlilik ve sınırlı alaşım kapasitesidir. Levha döküm tekniği ile donma aralığı dar alaşımlar üretilebilmektedir. Alaşımların donma aralığı arttıkça verimlilikte azalma görülmektedir.

Tablo 3.1. Sürekli levha döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımları [11]

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				

Rulo profilinin bir sonraki haddeleme işlemine uygun olabilmesi için merdane ayırma kuvveti tanımlanmış limitler içinde kalmalıdır. Yük hücreleri kullanılarak veya makinelerdeki hidrolik basınç ölçülerek ayırma kuvveti (seperating force) kontrol edilir. Deneysel ölçümler rulo profilinin parabolik bileşiminin, merdane ayırma kuvveti ile direkt ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Düşük ayırma kuvvetlerinde dökülmüş levha negatif profile sahip olurken, yüksek ayırma kuvvetlerinde levhada pozitif profil oluşmaktadır. Bu sınırlar arasında levhanın paralel olduğu değerler vardır. Merdane ayırma kuvveti merdane eğriliğinin etkisini ortadan kaldırabilir. Tip ekseni ve döküm hızı, profili yalnız merdane ayırma kuvveti değerini ani olarak değiştirerek etkileyebilir. Rulo kalınlığı boyunca meydana gelen parabolik olmayan yerel değişimlerin nedenleri kötü tip tasarımı, su kanallarının bloke olması, merdane şelinin zayıf desteğidir.

Tablo3.2'de merdane ayırma kuvvetini etkileyen faktörler görülmektedir. Döküm hızını arttırmak veya tip ekseni mesafesini azaltmak, segregasyon oluşum riskini artırmaktadır.

Tablo 3.2. Merdane Ayırma Kuvvetini Etkileyen faktörler [11]

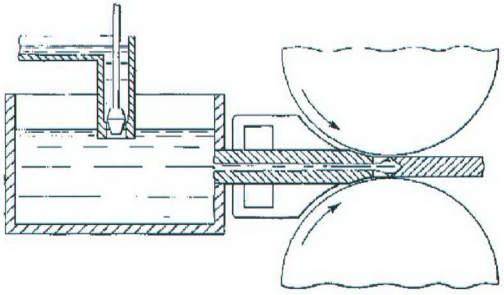
Parametre	Etkisi
Alaşım	Malzeme akış gerilimi - Donma aralığı
Döküm Hızı	Döküm hızı arttıkça ayırma kuvveti azalır.
Tip Ekseni	Tip ekseni mesafesi arttıkça ayırma kuvveti artar.
Sıcaklık	Sıcaklık arttıkça ayırma kuvveti azalır.
Rulo Genişliği	Rulo genişliği arttıkça ayırma kuvveti artar.
Merdane Yüzey Durumu	Yapışma ile ayırma kuvveti artar.

3.2. Temel Proses Elemanları

Levha döküm tekniğinde, temel proses elemanları ergimiş metal beslenmesi, merdane sistemi, döküm bölgesi ve hadde/rulo ara yüzeyidir.

3.2.1. Ergimiş metal beslenmesi

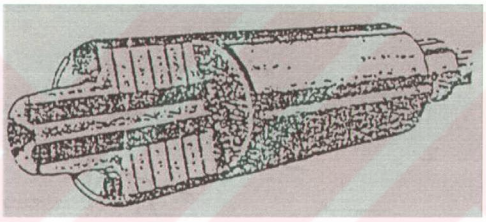
Levha döküm tekniğinde uygun ergimiş metal besleme sistemi seçiminin kritik olması, ürün kalitesini ve geometrisini doğrudan etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.3'de İkiz merdane döküm yönteminde merdanelerle temas noktasının detay görüntüsü verilmektedir [10].



Şekil 3.3. Tandiş – Tip – Döküm Makinesi Katılaşma Hattı Akış Şeması [10]

3.2.2. Döküm merdane sistemi

Levha döküm tekniğinde merdaneler, hem katılaşma için gerekli soğumayı, hem de haddelemeyi sağladığı için önemli bileşenlerdir. Çelik dökümünde verimliliğin sağlanması ve yüksek ısı transferi açısından merdane genellikle bakırdan yapılır. Bakır kabul edilebilirdir, çünkü çelik endüstrisinde merdaneler düşük yüklü koşullarda çalışırlar. Alüminyum levha dökümünde zıt koşulların mevcut olduğu Pechiney firması tarafından testlerle gösterilmiştir. Bu testlere göre bakır şeller (dış kabuk), üretimi ikiye katlamakta, ancak yüksek moment ve ayırma gücüne bağlı olarak çabuk deforme olmaktadır. Gerilim hesaplamaları ve kimyasal bileşim değişimleri gibi problemler çözüldükten sonra özel alaşımlı çelik şeller geliştirilmiştir. Şekil3.4' de şel ve kor diyagramı görülmektedir [14].

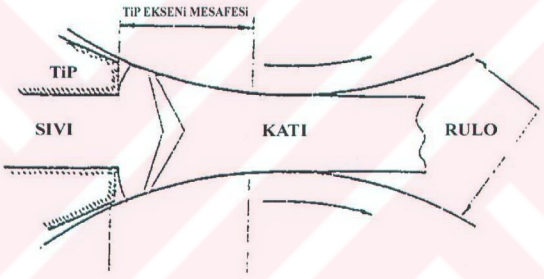


Şekil 3.4. TRC'de kullanılan içten su soğutmalı merdane örneği [11, 14]

Şelin birinci görevi ergimiş alüminyumun katılaşabilmesini sağlamak için ondan ısıyı almaktır. Döküm makinesinin verimliliği ısı transfer kapasitesi ile bağlantılıdır ve şel malzemesi için birinci şart iyi termal iletkenliktir. Şeller mekanik kaynaklı gerilimlere maruz kaldığından, kullanılan malzeme mekanik mukavemet, tokluk ve termal yorulmaya karşı yüksek dirence sahip olmalıdır. Bakır şeller , çelik şellerin iki katı verimlilik sağlarlar ancak onların mekanik özellikleri yeterli şel ömrü sağlayamamaktadır. Buna karşılık süper alaşımlar, termal çatlamaya karşı mükemmel dayanıma sahiptiler, ancak alüminyumun katılaşmasının normal döküm hızında gerçekleşmesine izin vermezler. Demir bazlı alaşımlar, çelikler, döküm prosesinin gerektirdiği şartları en iyi karşılayan malzemelerdir [11].

3.2.3. Döküm bölgesi

Bu bölge katılaşmanın ve haddelemenin aynı anda olduğu bölgedir. Levha döküm tekniği Şekil 3.6' dan da görüldüğü gibi çok basit bir prensibe dayanmaktadır. Ergimiş metal, içinden geçen su ile soğutulan merdaneler arasından geçerken Katılaşmakta aynı zamanda merdanelerin haddeleme eylemiyle son kalınlığa inmektedir. Basit görünmesine rağmen prosesi etkileyen birçok parametre olduğundan çok karmaşık fiziksel olaylar içermektedir. Çok kısa sürede gerçekleşen bu olayların en önemlileri; ergimiş metal sıvı akışı, ısı transferi, katılaşma, deformasyon, merdaneler ve rulo arasındaki hava aralığı oluşumu olarak verilebilir. Bu kritik bölge üzerinde değişik matematiksel ve fiziksel modeller geliştirilmiştir.



Şekil 3.5 TRC'de katılaşma bölgesinin şematik gösterimi [11]

3.2.4. Merdane / Rulo Ara Yüzeyi

sürekli levha döküm tekniği ergimiş metal, merdane / rulo ara yüzeyinde ısı kaybederek katılaşmaya başlar. Ara yüzeyin performansı levhanın kalitesi üzerinde doğrudan etkisi olup birçok parametre tarafından etkilenmektedir. Bu parametreler; kalıp malzemesi, yüzey tekstürü, atmosfer, metalostatik basınç ve ıslatma özelikleridir. Döküm esnasında ergimiş metal giriş boyunca merdanelerle sıkı bir ilişki içinde olup ısı kayıpları yüksektir. Merdanelerle ergimiş sıvı metal temas etmesinin ardından katılaşma başlar. Ancak yüzeyde oluşan oksit tabakası ısı transferini azaltır. Bunu takip eden bölgede, katılaşan levha sıcak ortamda pozitif baskıya ve bir kez daha merdane yüzeyiyle temasa maruz kalır. İstenen

termal performansı elde edebilmek için bu parametrelerin doğru kombinasyonun şeçilmelidir.

3.3. Döküm Mikroyapısı

Sürekli levha döküm tekniğinde birbiri ardına oluşan katılaşma ve sıcak haddeleme sonucu ortaya karakteristik bir mikroyapı çıkar. Bu mikroyapı geleneksel D.C. ingot ve sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen levhaların mikroyapısından farklıdır. Sürekli levha dökümünde oluşan hızlı katılaşma ve deformasyon sayesinde tane boyutu küçük levhalar elde etmek mümkündür. Geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında sürekli dökülmüş levhadaki intermetalik partikül boyutunda %80' lik bir küçülme vardır. Sürekli dökülmüş alüminyum levhada inhomojen bir partikül dağılımı görülmektedir.

Sürekli dökülmüş levhanın döküm makinesinde çıktığındaki düşük sıcaklığı (ortalama 300^0C), döküm esnasında oluşan sıcak haddelemede malzemenin tamamıyla yeniden kristalleşmesine izin vermez. Bu ise sürekli dökülmüş levhada kalıntı gerilmelerinin oluşmasına yol açar.

Sürekli dökülmüş alüminyum levhanın kendine has mikroyapısı bu malzemenin bazı kullanım alanlarında özellikle tercih edilmesine neden olmaktadır. Örnek olarak hard-disk üretimi verilebilir. Hard-disklerin hafıza kapasitesi büyük oranda bilgilerin manyetik olarak yazılıp sonra da okunabileceği minimum alana bağlıdır. Bu alan manyetik kaplamanın kalınlığı ve düzgünlüğüne bağlı olmakta, bu da hard-diskin yüzey kalitesi ile doğru orantı göstermektedir [15].

5000 serisi alaşımlarının tipik karakteristikleri süreksiz akma göstermeleri ve iç yapılarında MHS bulundurmalarıdır. 5000 serisi alaşımların mikroyapıları incelendiğinde, en önemli element olan magnezyumun katı çözeltideki çözünürlüğü %2 dir ve bu miktar 720 ^{0}C da %14-15'e yükselir. Bundan dolayı magnezyumun büyük bölümü çözeltidedir ve dengedışı koşullarda veya tav esnasında Mg_5Al_8 oluşur. İçerikteki Si, Mg_2Si oluşumunu sağlar ve bu faz %3-4 Mg içeren alaşımlarda matriste çözünmez. Düşük magnezyumlu alaşımlardaki Fe ve yüksek Si, Fe_2SiAl_8 oluşumuna sebep olur.

Magnezyumun refrakter malzemeleriyle olan yüksek reaksiyon ve oksitlenme eğilimi ergimiş metale büyük miktarlarda inklüzyonun girmesine sebep olur. %

0.05 mertebesindeki Be ilavesi bu oksidasyon azalır. Fırın ortamında bulunabilecek su buharı sıvı metalde yüksek miktarda H_2 çözünmesine sebebiyet verir. Çözünmüş bu gaz ısıl işlemler esnasında dahi salıverilerek porozitelerin oluşmasına sebep olur. Düşük Magnezyum (%2-4) içerikli malzemelerin dökülebilirlik özellikleri yüksek olanlara (%7-12) kıyasla daha düşüktür. Yüksek Magnezyum içerikli alaşımlarda dahi mevcut ötektikler nisbeten daha düşüktür. Si bu özellik için en idealidir ancak mekanik özelliklerde de ciddi şekilde gevrekliği beraberinde getirir. Plastik deformasyon homojenizasyon işlemini hızlandıran bir rol oynar. Bundan dolayıda Mg'nin segregasyonu malzeme özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirmez. Her ne kadar Si, Fe ve Cr un segregasyonu çok nadiren gerçekleşse de büyük boyutlara sahip primer Mg_2Si veya Cr, Fe ve Mn bileşikleri oluşturabilirler. Bu fazların varlığı malzemenin yorulma direncini ve sünekliğini düşürür.

Mikroyapıda bulunan sınırlı miktardaki ötektik yapı ve ısıl işlemler sonucu göreceli olarak daha yüksek mukavemetlere sahip kaynaklar elde edilebilmesi Al-Mg alaşımlarının kaynaklı yapılarda çok sıklıkla kullanılmasını sağlar. Ancak dendritler arası bölgede segregasyonun artmasına sebep olan elementlerin bulunması kaynak bölgesinin gevrekliğini ve kırılma eğilimini arttırır.

Tablo 3.3. Al-Mg alaşımlarında oluşabilecek muhtemel denge fazları (P : peritektik reaksiyon) [14].

	Kimyasal formül	Kristal yapı	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime veya peritectic sıcaklığı (^oC)
α(Al-Mg)	Al_3Mg_{12}	FCC	2.23	451
β(Al-Mg)	---	---	--	390 (P)
(Mg-Al)	$Al1_2Mg_{17}$	BCC	2.06	462

3.4. Katılaşma mekanizması

Katılaşma mekanizması normal şartlar altında 3 aşamada gerçekleşir. Birinci aşama metal yüzeyinin merdanelere dokunması ile birlikte hızlı olarak katılaşmasıdır. İkinci aşamada; levha merkezi yarı katı hale gelerek çekilir ve levha yüzeyi merdane ile temasını kaybeder. Bu ise ısı transferinin düşmesine ve yüzeyin intergranüler olarak yeniden ergimesine yol açar. Üçüncü aşama da ise metal merdanelere basınç uygulayacak kadar katılaşır. Bu sayede ısı transferi artar ve katılaşan metalden ısının büyük bir bölümü alınır.

Katılaşmanın ikinci aşamasında görülen yeniden ergime büyük intermetalik partiküller oluşturmanın yanında merdane yüzeyinde merdanenin her devrinde yeniden ergimeyi başlatan lokalize bir oksit büyümesine neden olur. Merdane yüzeyinde oluşan bu oksit alanları dökülen levha üzerinde kaba bir yapıda enlemesine bantlar şeklinde dalgacıklar oluşturur.

3.5. Döküm hataları

Sürekli döküm levha üretiminde bir takım döküm hatalarına rastlanmaktadır. Bunlar; metalin merdanelere yapışması, ısı yolları, merkez hattı segregasyonu, tipte yerel donma, kenar donması, gaz boşluğu, eğrilik, E bandı, merdane çatlağı izleri, besleme yetersizliği olarak verilebilir. Bütün bu hatalar kontrol altında tutuldukları taktirde elimine veya minimize edilebilir [13].

4. ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK

4.1. Genel Bilgi

Üretilen metallerin %85'i bir veya daha fazla deformasyon işleminde şekillendirildikten sonra kullanılmaktadır. Şekillendirilebilme, mukavemet ile birlikte, yapısal eleman olarak kullanılan malzemelerin en önemli özelliğini teşkil eder. Bu, şekillendirilebilme çalışmalarının gereğini ve önemini göstermektedir [5].

Şekillendirilebilirlik; bir malzemenin belirli bir yöntemle, belirli bir tasarıma uygun olarak şekil alma yeteneği olarak tanımlanır. Malzeme, yöntem ile tasarım şekillendirilebilirlik karakteristiklerini belirleyen temel araçlardır.

Şekillendirilebilirlik gerilme, deformasyon, deformasyon hızı, sıcaklık gibi işlem değişkenlerine ve ikinci faz tanecikleri gibi malzeme değişkenlerine bağlıdır. Plastik deformasyona uğrayan bir malzemede gerilme ve deformasyonlar üniform olmayıp, bir noktadan diğerine değişkenlik gösterir. Kalıp tasarımı, ön parça geometrisi, yağlama gibi işlem değişkenleri, iş parçasındaki gerilme ve deformasyon dağılımlarını belirler. Bu değişkenlerin denetimiyle kırılmadan önce daha fazla deformasyon elde etmek mümkündür.

Bu kavramlar, şekillendirilebilirliğin iki fonksiyonun bağıntısı olarak gösterilmesine yol açmıştır [5].

$$\text{Şekillendirilebilirlik} = f1(\text{malzeme}) \times f2(\text{işlem}) \qquad (4.1)$$

Bu bağıntıda, f1 malzeme sünekliğinin bir fonksiyonu ve f2 işlemin belirlediği ve işlem sırasında başlıca ikincil çekme gerilmelerinden oluşan gerilme durumunun bir fonksiyonudur. Böylece, f1 ve f2:

f1 (inklüzyon şekli, miktarı, büyüklüğü, ikinci faz taneciklerinin şekli, miktarı, büyüklüğü, tane boyutu, v.b.)

f2 (ürün geometrisi, ön parça geometrisi, gerilme deformasyon durumu, deformasyon hızı, sıcaklık, yağlama v.b.)

şeklinde ifade edilebilir ve eşitlik (4.1) şekillendirilebilirliğin tarifini verir [5].

Şekillenebilir saclar, dayanıklı tüketim malları ve otomotiv endüstrisinin önemli bir girdisini oluşturmaktadır. Ancak, şekillendirme sırasında kullanılan sacların hepsi nihai ürüne dönüştürülememekte ve belirli oranda malzeme yırtılma veya benzer diğer nedenlerle hurdaya ayrılmaktadır. İlgili standartlar belirli bir hurda oranına izin vermekle birlikte, zaman zaman hurda oranının kabul edilebilir düzeyin çok üstüne çıktığı, hatta bazı hallerde %50'yi aşabildiği bilinmektedir.

Şekillendirme işleminde karşılaşılan başarısızlık akla önce malzeme kalitesini getirmektedir. Gerçekten de hurda oranındaki yüksekliğin malzemedeki bozukluktan kaynaklandığı ileri sürülebilir. Ancak şekillendirme işleminde karşılaşılan başarısızlık malzeme malzeme kökenli olabileceği gibi, diğer etkenlerden de kaynaklanabilir. Presleme işlem parametresinin uygun seçilmemesi, yağlama şartlarının uygun ya da yeterli olmaması, yanlış kalıp zımba tasarımı teker teker veya birlikte başarısızlığın nedeni olabilir.

Şekillendirme işlemi bu karmaşıklığı içinde değerlendirildiğinde, karşılaşılan sorunun gerçek kaynağını belirlemek zorlaşmaktadır. Yağlama şartları ve presleme işlem parametreleri mümkün olduğu sınırlar içerisinde kolaylıkla değiştirilebilmekte, ancak bu sorunu çözmediği zaman gündeme gelen malzeme mi kalıp mı ikilemine bir yaklaşım göstermek kolay olmaktadır. Kalıp tasarımında bir değişikliğe gidebilmek için önce karşılaşılan sorunun tasarımdan kaynaklandığının belirlenmesi zorunludur. Bunun için de, malzemenin şekillendirme sınır değerlerinin (şekillendirme diyagramlarının) bilinmesi gereklidir. Bu değerler bir malzeme özelliği olarak belirlendiğinde, şekillendirme işlemi kolaylıkla değerlendirilebilmektedir. Kısaca diyagram, ait olduğu malzemede neyin yapılıp neyin yapılmayacağını açıklıkla göstermekte, kullanıcıya üreteceği parça için yol göstermektedir.

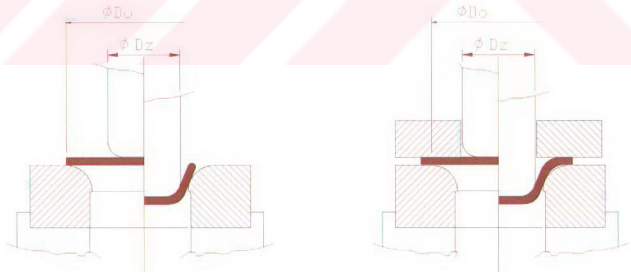
4.2. Şekillendirme Çeşitleri

4.2.1. Derin Çekme

Derin çekme işlemi, yassı bir metalik saçtan üç boyutlu bir kap elde etme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.1'de derin çekme işlemini tanımlayan örnekler görülmektedir. D_0 çapındaki metalik bir taslak, D_z çapında bir zımba yardımıyla bir kalıbın içine çekilerek üç boyutlu bir kap elde edilmektedir [16].

Derin çekme işleminde, malzeme radyal çekme kuvvetleri ile kalıp içine çekilirken, taslağın kalıp içine henüz girmemiş bölgesinde çevresel basma kuvvetleri oluşmaktadır. Çevresel basma kuvvetleri malzemenin büzülerek kalınlaşmasına ve önlem alınmaz ise malzemenin kırışmasına neden olmaktadır. Kırışma olayı taslağın kalıp içine henüz girmemiş bölgelerinin uygun bir kalıp yardımıyla sıkıştırılması sonucunda önlenebilir [16]. Şayet sıkıştırma kalıbı kullanılmadan derin çekme işlemi uygulanacak ise, kırışmayı önlemek için derin çekme oranı $D_0/D_z = 1{,}05$ değerinden küçük olması tavsiye edilmektedir [5].

Derin çekme işleminde D_0/D_z oranı, derin çekme oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu şekillendirme işleminde ana amaç, mümkün olduğu kadar derin kap elde edilmesidir.



Şekil 4.1. Derin çekme işlemine ait şematik örnek [16].

Derinliği artırmak amacıyla taslak çapı sınırsız olarak artırılamamaktadır. Kullanılabilecek maksimum taslak çapı, Formül 4.2'deki derin çekme oranı sınırı (D.Ç.O.S.) ile belirlenmektedir [16].

D.Ç.O.S. $\{ D_0/D_z \}max$ (4.2)

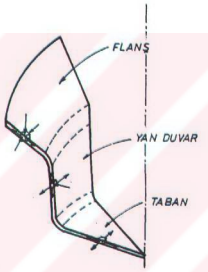
Yukarıdaki eşitlikte;

D_0 : Maksimum taslak çapı

D_z : Zımba çapı

İdeal şartlarda D.Ç.O.S. nın maksimum teorik sınırı 2,7 olarak verilmektedir. Bu oranın aynı zamanda malzeme özellikleri ve işlem şartlarına bağlı olduğu belirtilmektedir [26].

Derin çekme işleminde Şekil 4.2'de görüldüğü gibi malzeme 3 ayrı bölgede farklı gerilme ve plastik şekil değişiminin etkisi altında bulunmaktadır.



Şekil 4.2. Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu [5].

Zımbanın tabanına temas eden taslağın orta bölgesi zımbanın çevresi boyunca, zımbanın üstüne doğru bükülmektedir. Bükülmeden dolayı, bu bölgede kalınlık bir miktar azalmaktadır. Zımbanın hareketinden dolayı, parçanın tabanında iki eksenli çekme gerilmesi oluşmaktadır. Taslağın dış çevresi kalıp girişinde radyal olarak kalıp içine çekilmektedir. Malzeme kalıp içine çekildikçe taslak çevresi πD_0 değerinden πD_z değerine doğru azalmaktadır. Böylece malzeme çevresel olarak basma, radyal olarak çekme gerilmelerinin etkisi altında kalmaktadır. Ayrıca, sıkıştırma kalıbı da taslak düzlemine dik yönde basınç uygulamaktadır. Malzeme kalıp içine çekildikçe çevresel büzülmeden dolayı kalınlığında artmalar olmaktadır. Malzeme, kalıp yarıçapı üzerinden geçerken bükme ve doğrultma işlemine maruz kalmaktadır. Bu arada radyal çekme kuvvetinin de etkisi ile kalınlığı azalmaktadır. Bu kalınlık azalması daha önceki kalınlık artışını bir miktar dengelemektedir. Parçanın yan duvarında sadece çift eksenli çekme

gerilmesi söz konusudur. Zımba ile kalıp arasındaki mesafe, malzemenin artmış olan kalınlığından az ise, malzeme burada basınç altında ütüleme işlemine maruz kalmaktadır. Genelde, kalıp ile zımba arasındaki mesafe, sürtünme kuvvetlerini azaltmak ve zımbanın aşınmasını önlemek için malzeme kalınlığından belirli oranlarda büyük tutulmalıdır. Sadece malzeme kalınlığının homojen olması istenilen durumlarda, söz konusu mesafe malzeme kalınlığından küçük tutulmalıdır.

Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerde kalınlık değişimleri de meydana gelmektedir. Derin çekmede zımbanın uyguladığı kuvvet, ideal şekil değiştirme kuvveti, sürtünme kuvvetleri ve şayet varsa ütüleme işlemi için harcanana kuvvetlerin toplamına eşit olmaktadır. Şekil değiştirme sertleşmesinden dolayı plastik gerilme sürekli artacağından, ideal şekil değiştirme kuvveti işlem boyunca sürekli artacaktır. Sürtünme kuvvetlerinin büyük bir kısmı sıkıştırma kalıbının yüzeyinde oluşur. Bu kuvvet bileşeni başlangıçta hızla artmaktadır. İşlem ilerledikçe taslağın sıkıştırma kalıbı ile temas eden yüzeyi azaldığından, sürtünme kuvvetleri de azalmaktadır. Ütüleme olayı da derin çekme işleminin sonlarına doğru başlamaktadır [5,16].

Derin çekme kuvveti, zımba yoluyla üretilecek parçanın tabanına uygulanmaktadır. Bu kuvvet dolaylı olarak yan duvarlara da iletilmektedir. Kırılma olayı, zımba eğrilik yarıçapının hemen üstünde görülmektedir. Bu bölgede, malzeme bükme veya radyal çekmeye uğramadan sadece çekme birim şekil değişimine uğramaktadır. Bu bölgedeki şekil değiştirme, düzlemsel plastik şekil değiştirme türünde olup, kalınlığın incelmesine neden olmaktadır. Hasar, önce boyun verme daha sonra da yırtılma şeklinde meydana gelmektedir .

Derin çekilebilirlik genellikle, başlangıçtaki taslak (derin çekmede kullanılacak disk) çapının, derin çekilmiş kabın çapına oranı ile ifade edilmektedir. Derin çekilen kabın çapı, zımba çapına çok yakın olduğundan hesaplamalarda, zımba çapının kullanımı oldukça yaygındır. Her malzeme için bir derin çekilebilirlik sınırı vardır.

Derin çekme işlemlerinde deformasyon miktarının ifadesinde sıkça kullanılan tanım ise Formül 4.3'de verilen redüksiyon oranıdır [5].

$$R.O. = 1 - (D_0/D_z)max \qquad (4.3)$$

Derin çekilebilirlik, metalin cins ve kalitesi, levha kalınlığı gibi malzeme parametreleri ile zımba çapı, kalıp ve zımbanın eğrilik çapı, derin çekme hızı, yağlama, baskı kuvvetleri, kalıp-zımba açıklığı gibi işlem parametrelerinden etkilenmektedir. Derin çekme işleminde en ideal şartların sağlanması halinde ulaşılabilen maksimum redüksiyon oranı %60, ortalama değer ise %50 olarak verilmektedir. Malzeme ve diğer şartlarda bağlı olarak 1.6 ile 3.0 arasında değişen derin çekme oranı sınırı değeri alüminyum için maksimum 2'dir [5]. Bu da alüminyumun az karbonlu çeliklere nazaran daha kötü şekillendirilebilme kabiliyetine sahip olduğunu ve üzerinde daha hassas çalışmanın gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Klasik çekme deneylerinden elde edilen %uzama, çekme ve akma dayanımı gibi mekanik özellikler yardımıyla şekillendirilebilirliğin tespiti mümkün değildir. Ancak, deformasyon sertleşmesi üssü, kalitatif bir yaklaşımda bulunmaya imkan sağlayabilir. Çekilebilirliğin belirlenmesinde dikey anizotropiden yararlanma eğilimi oldukça fazladır [17]. Bugün için çelikte ortalama dikey anizotropi ile çekilebilirlik arasında güvenilirlik bir ilişki kurulmuşsa da, alüminyum için bazı tereddütler mevcuttur [5,18]. Bazı araştırmacılar derin çekilebilirlik ile, ortalama dikey anizotropi arasında böyle bir bağıntının kurulmasını mümkün görmezsen, diğer bir kısım araştırmacı ise, burada esas alınacak anizotropi değeri (R_0, R_{45}, R_{90} ve R) üzerinde tartışmaktadırlar [5]. Bütün bunlara rağmen, iyi derin çekilebilirliğin sağlandığı bir ortalama dikey anizotropi değeri aralığı tesbit edilebilirse şekillendirilebilirlik çalışmalarına önemli oranda katkıda bulunacaktır.

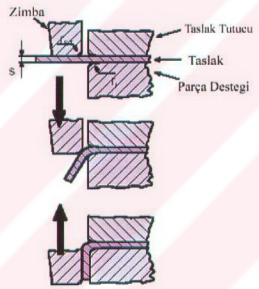
Birçok derin çekme işleminde, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından yapılmış kalın ve geniş kesitli parçalar oda sıcaklıklarında şekillendirilebilirler. Ancak, alaşımın yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda sünekliğin artması ve düşük mukavemet sıcak çekme yöntemiyle oldukça kalın ve geniş parçaların şekillendirilmesine olanak verir. Sıcak çekme işlemlerinin en sık uygulandığı 5083, 5086, 5456, 2024, 2219, 6061, 7075 ve 7178 alüminyum alaşımlarıdır [19].

Sıcak çekme işlemleri için güçlü presler ve bununla ilgili ekipmanlara ihtiyaç vardır. Derin çekme sıcaklıkları 175 – 315 ^{0}C arasında değişkenlik gösterir. Söz konusu sıcaklıkta, iş parçasına uygulanacak zamanın uzunluğu, az deformasyon sertleşmesi ile bazı bölgelerde aşırı tane büyümesinden kaçınarak kontrol edilir.

Bu tip uygulamalarda yağlayıcı olarak grafit esaslı don yağı ve sert sarı sabun orta sıcaklıklarda kullanılır. 260 ^{0}C üzerindeki sıcaklıklarda yağlayıcılar grafit ve $Mo(SO_3)_2$ içermelidir [19].

4.2.2. Bükme

Bükme, dönme ve kuvvetin bileşimi ile dikişsiz asimetrik şekillerin yassı metal şekillendirmesinde kullanılan bir metottur. En sık rastlanan uygulamalarda; düz haddelenmiş metal taslak, yuvarlatılmış küt bir parça ile dönen mandrele kuvvet uygulanarak şekil verilir. Ancak bu uygulamaların dışında kaynaklı veya dikişsiz borularda bu yöntemle şekillendirilebilir. Alüminyum alaşımlarının bükme yöntemi ile şekillendirmesinde çelik ve diğer metallerin şekillendirilmesinde kullanılan otomatik bükme makineleri, manuel torna tezgahları ve aynaları kullanılır.



Şekil 4.3. Bükme işleminin basit olarak şematik gösterimi [20].

Manuel bükme tornaları ve basit araçlar 0,50 – 2,05 mm kalınlığına sahip alüminyum taslakların şekillendirilmesi için uygulanır. 6,4 mm kalınlığına kadar alüminyum taslaklar oda sıcaklığında, daha kalın ve büyük parçalar yarı-otomatikten tam otomatiğe kadar değişen özel preslerde ve sıcak bükme işlemleri ile bükülebilirler. Bükme işlemlerinde kullanılacak alüminyum alaşımlarından istenen özellikler süneklik, oldukça düşük akma – çekme mukavemet oranı, düşük deformasyon sertleşmesi üssü ve küçük tane boyutudur.

Bükme yöntemiyle şekillendirmede; düşük ve orta mukavemetli alaşımlardan 1100, 2219, 3003, 3004, 5052, 5086 ve 5154, yüksek mukavemetli ısıl işlem görebilir alaşımlardan 2014, 2024 ve 6061 en sık kullanılan alüminyum alaşımlarıdır. Eğer ısıl işlem görebilir alaşımlarda şekillendirme aşırı ise, bükme

esnasında bu tip alaşımlar sık sık tavlanması veya sıcak bükme işlemine tabi tutmak gerekir. Isıl işlem görebilir alaşımlarda bükme işlem için kullanılan bir metod aşağıda verilmiştir:

- Hemen hemen nihai şeklindeki tavlanmış taslağın bükülmesi

- Isıl işlem ve soğutma

- Nihai şeklinde bükme

Eğer ısıl işlem ve soğutma sonrası nihai şeklinde bükme işlemi yapılamazsa, soğutulmuş parçalar buzdolabına yerleştirilmeli veya kuru buz içinde paketlenmelidir ve büküme kadar -20 ^{0}C'de tutulmalıdır. Bükme işleminde uygulanacak proses hızları taslak çapı ve zımba çapı ile ilgilidir. Oransal hız taslak çapının artması ile artmaktadır. Alüminyum alaşımları için ortalama hız 915 m/dak civarındadır. Bükme işleminde az da olsa yağlama yapılmakta olup genellikle don yağı, balmumu vaksı ve petrol jeli kullanılır. Sıcak bükme işlemlerinde ise; kerosen için koloidal grafit veya $Mo(SO_3)_2$ komponentleri kullanılır [19].

Bükme işleminde malzemenin dış yüzeyinde germe, iç yüzeyinde sıkıştırma olayı söz konusudur. Orta bölgede sürekli ilk boyutunda kalan nötr bir düzlem vardır. Belirli bir malzeme kalınlığı (h) için, bükme yarıçapı (R_b) azaldıkça dış yüzeyindeki çekme birim şekil değişimi artar. Dış yüzeyindeki aşırı deformasyon çatlamaya ve iri taneli malzemelerde portakal yüzeyi gibi pürüzlü bir yüzeyin oluşumuna neden olur. Bükme yarıçapının (R_b) tayininde sınırlayıcı koşul kırılma olayıdır. Minimum bükme yarıçapı (R_b) çekme deneyinden elde edilen kesit daralması ($r = \Delta A/A_0$) değerine bağlı olarak;

$$R_b = h\,\frac{1}{(r-1)} \qquad r < 0{,}2 \text{ için} \qquad (4.4)$$

$$R_b = h\,\left(\frac{(1-r)^2}{(2r-r^2)}\right. \qquad r \geq 0{,}2 \text{ için} \qquad (4.5)$$

eşitliklerine göre seçilir. Nötr düzlemde malzeme elastik davranış gösterdiğinden, bükme kuvveti malzemeye uygulandığı sürece nötr düzlemde var olan elastik gerilme, kuvvet kalkınca yok olur. Böylece bükülen parçada, bükme kuvvetinin

kalkması ile geriye yaylanma görülür. Bükme miktarı az (R_b/h oranı büyük) ise elastik bölge daha yaygın, geriye yaylanma olayı daha fazla olur. Bu durumda malzeme geriye yaylanma açısı kadar daha fazla bükülerek sınama yanılma yoluyla geriye yaylanma olayı dengelenerek, arzu edilen bükme açıları elde edilir. Bükme kuvveti (P_b) aşağıdaki iki bağlantının birisinde yaklaşık olarak hesaplanabilir [21].

$$P_b = \frac{b.h^2\sigma_ç}{W_b} \tag{4.6}$$

$$P_b = \frac{b.h.\sigma_a}{2\left(R_b + \frac{h}{2}\right)}.\tan\frac{\alpha_b}{2} \tag{4.7}$$

Burada, b bükülen parçanın bükme eksenine paralele olan boyutu, h malzeme kalınlığı, W_b kalıp genişliği veya açıklığı, R_b bükme yarıçapı, α_b bükme açısı, malzemenin σ_a akma mukavemeti ve $\sigma_ç$ çekme mukavemetidir.

Verilen bütün bu bilgilerin ışığı altında bükme metodu ile şekillendirilen alüminyum alaşımları pişirme kapları, süt kutuları, reflektörler, uçak ve uzay parçaları, mimari sektör, tank kafaları, cadde ışıkları, çukur kap,...v.b. gibi üretimlerde kullanılmaktadır.

4.2.3. Gererek Şekil Verme

Tüm alüminyum alaşımlarının hemen hemen hepsi gererek şekillendirilebilirler. Gererek biçimlendirme işleminde metalik sac iki ucundan veya çevresi boyunca bağlanır. Daha sonra biçimlendirme kalıbı, saca doğru ilerleyerek, malzemenin gerilmesini ve kalıbın şeklini almasını sağlar. Gererek şekillendirmede istenen özellikler yüksek uzama, geniş şekillendirme aralığı, tokluk ve ince tane yapısıdır. Tablo 4.1'de gererek şekillendirmede en çok kullanılan alüminyum alaşımlarının uzama ve şekillendirme aralığının gerilebilirlik oranı üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Gererek Şekillendirmede en çok kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve gerilebilirlik oranları [19]

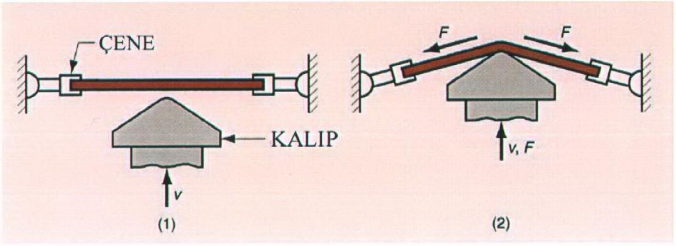
Alaşım	Çekme Mukavemeti (MPa) (a)	Akma Mukavemeti (MPa) (b)	Şekillendirme Aralığı (c = a - b)	% Uzama (50 mm)	Gerilebilirlik Oranı
7075-W (Isıl İşlem gördükten sonra havada soğutulmuş)	331	138	193	19	100
2024-W (Isıl İşlem gördükten sonra havada soğutulmuş)	317	124	193	20	98
2024-T3	441	303	138	18	95
6061-W (Isıl İşlem gördükten sonra havada soğutulmuş)	241	145	96	22	90
7075-0	221	97	124	17	80
2024-0	186	76	110	19	80
6061-0	124	55	69	22	75
3003-0	110	41	69	30	75
1100-0	90	35	55	35	70
7075-T6	524	462	62	11	10

Gererek şekillendirmede malzeme özelliklerinin ve işlem koşullarının etkisi biçimlendirilen parçanın kritik boylarına (silindirik parçalarda I_G çapına ve h_G derinliğine) bağlı olarak bulunan Gererek Biçimlendirme Oranı (G.B.O.) ile de incelenmektedir. Malzemenin kalınlığı arttıkça, tane boyutu küçüldükçe, deformasyon sertleşmesi üssü (n) arttıkça, deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) arttıkça G.B.O.'da artmaktadır [16].

$$G.B.O. = h_G / I_G \tag{4.8}$$

Alüminyum alaşımlarının gererek şekillendirmesinde genellikle suda çözünebilen yağlar kullanılır. Bunlar kalsiyum esaslı gresler, parafin, ticari vakslardır. Şekillendirme esnasında aşırı yağ uygulandığı takdirde iş parçasının yüzeyinde bukleler meydana gelebilir. İş parçası ile kalıp arasına bazen plastik veya kauçuk

tabaka konularak yağlama sağlanır. Pürüzsüz düz yüzeyli plastik kalıplar düşük sürtünme katsayıları sebebiyle yağlama gerektirmeyebilirler [19].



Şekil 4.4. Gererek şekillendirmenin basit olarak şematik gösterimi [20].

Gererek şekillendirme metodu otomotiv, mimari, uçak sanayi ve uzay araçlarında panellerde, pencerelerde, motorlarda, uçak gövdelerinin yapımında kullanılır. Gererek şekillendirme genellikle diğer şekillendirme yöntemleri ile beraber kullanılırlar.

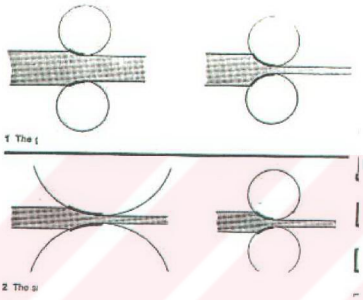
4.2.4. Haddeleme

Haddeleme, malzemeyi eksenleri etrafında dönen ve merdane olarak isimlendirilen iki silindir arasından geçirerek yapılan plastik şekil verme işlemidir. Haddeleme sırasında merdaneler aynı hızda ve birbirlerine zıt yönde dönerlerken, merdaneler arasından geçen malzeme istenen şekli alır. Hadde ürününün cinsine göre merdanelerin yüzeyi düz veya profilli olabilir. Yassı metallerin haddelenmesinde silindirik yüzeyli profiller kullanılır.

Soğuk haddelemenin amacı; blok halinde dökülmüş malzemeleri istenen kalınlık, yüzey kalitesi, mekanik ve metalurjik özellikleri ve maliyeti sağlayacak şekilde, düz plaka veya haddelenmiş ürün haline getirmektir. Malzemeye uygulanan ön ısıtma ve homojenleştirme prosesleri metalin iç yapısını değiştirmektedir. Bunun mukabili haddeleme işlemi ile malzemeye uygulanan deformasyon miktarı malzemenin içyapısında değişimleri meydana gelmesini sağlar.

Haddeleme, sıcak ve soğuk haddeleme olarak iki şekilde uygulanır ve temel prensipleri aynıdır. Metal bir çift merdanenin arasındaki "aralık" tan geçerken bu merdanelerin uyguladığı basınç ile deformasyona uğrar ve incelir. Basınç ile kuvvet arasındaki farka dikkat edilmelidir. Basınç, birim alana düşen kuvvettir. Basınç, ($kgxcm^2$) veya ($tonxm^2$) gibi birimlerle veya başka birimlerle ölçülür.

Uygulanan basınç, kuvvetin uygulandığı alana bağlıdır. Bir çift kar ayakkabısı, üzerindeki insanın ağırlığını geniş bir alana yayar. Böylece kara yapılan baskı azalacağından kara batılmaz. Aynı prensiple, eğer alan büyük ise, kuvvet bu büyük alana yayıldığından basınç azalır. Sivri topuklu ayakkabı giyen bir bayanın ağırlığının küçük bir alanda toplanması ile çok sert zeminlerde bile çöküntü yapabilir. Aynı prensiple, eğer alan küçük ise kuvvet toplandığı için basınç yükselir.



Şekil 4.5. Haddeleme işleminde temas yayının ve ezmenin sembolik gösterimi [22].

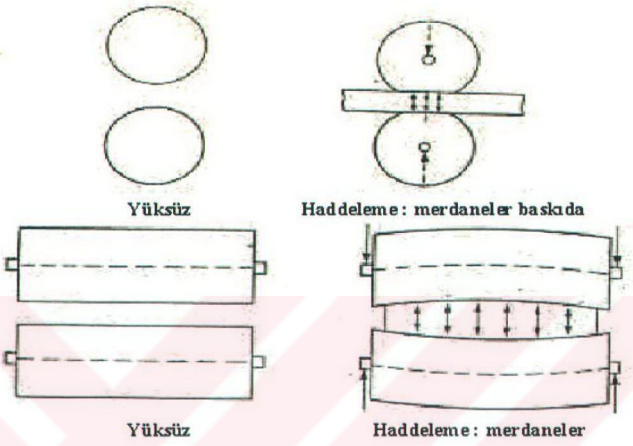
Bu yüzden merdaneler arasındaki metalin deformasyonu (ezme) uygulanan kuvvete ve temas alanına bağlıdır. Merdanelerin ve metalin birbirine temas alanı merdanenin büyüklüğüne ve uygulanan ezme miktarına bağlıdır.

Yüksek ezmeler uygulayabilmek için için temas yüzeyi mümkün olduğu kadar küçültülmeli ki, maksimum basınç elde edilebilsin. Bu da küçük çaplı merdaneler kullanılarak elde edilebilir.

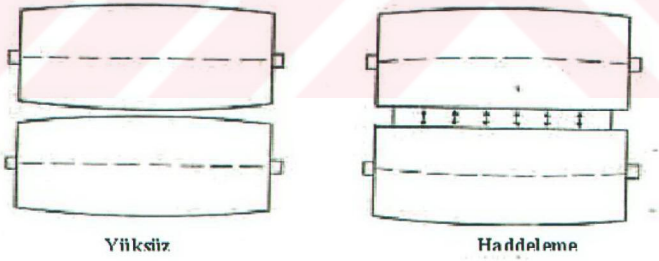
Newton tarafından keşfedilen doğanın kanunlarından birisi "her etkiye eşit ve ters yönde bir tepki vardır." kanunudur. Bunun bir sonucu olarak şerit halindeki metale baskı uygulayan merdaneler metal tarafından aynı ölçüde bir kuvvetle birbirlerinden ayrılmağa zorlanırlar. Bu tepki avuç içersinde bir cisim sıkıldığında da görülebilir. Elimizdeki cisim bize tepkisini hissettirir. Eğer bu cisim sert ise deride iz bırakmaya başlar.

Merdaneler haddeleme sırasında malzeme tarafından birbirlerinden ayrılmaya zorlandıklarında hafifçe düzleşirler ve eğilip, bükülürler. Şekil 4.6'daki merdanelerin ortası kenarlarından daha kalın malzeme üreteceği açıkça

görülmektedir. Bu durumu düzeltmek için merdaneler bükülme miktarı kadar pozitif bombeli (dışbükey) taşlanarak büküldüklerinde aralarındaki açıklığın düz olması sağlanır (Şekil 4.7).

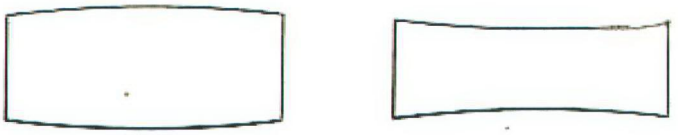


Şekil 4.6. Haddeleme işleminde esnasında merdanelerin bükülmesi [22].



Şekil 4.7. Pozitif bombe sonucu merdanelerin düzelmesi [22].

Ortası kalın, kenarları ince olan merdaneye Pozitif bombeli (dışbükey) merdane denir. Ortası ince kenarları kalın olan merdaneye Negatif bombeli (içbükey) merdane denir. (Şekil 4.8)



Şekil 4.8. Merdane bombelerinin gösterimi [22]

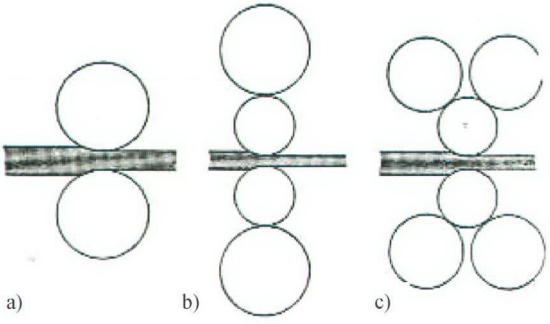
Eğrilme ve düzleşme gözle görülebilmeleri için şekillerde büyük ölçüde abartılmıştır. Gerçekte çap farkları mikron mertebelerinde olup çok küçüktür. Bombe iki şekilde elde edilir.

1) Mekanik bombe (merdanelerin bombeli taşlanması),

2) Termal bombe (haddeleme sırasındaki ısı yüzünden merdanelerin genleşmeleri)

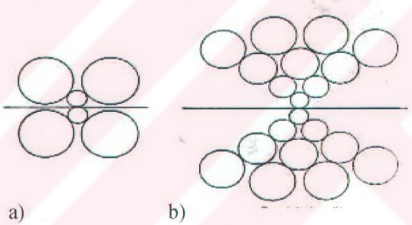
Genleşme miktarı, bu yüzden de "düzgünlük" sıcaklığın derecesine bağlıdır. Bu da haddeleme sırasında hem soğutma hem de yağlama amacıyla hadde yağı kullanılarak kontrol edilir.

Haddeler, bünyelerinde bulundurdukları merdane sayısına göre değişik çeşitlerde görülebilirler. En basit hadde sadece 2 merdaneden oluşur ve buna "2-high mill" yani "2 katlı hadde" denir (Şekil 4.9a).



Şekil 4.9. a) 2'li hadde , b) 4'lü hadde , c) 6'lı hadde [22].

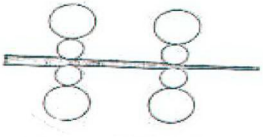
Daha önceden de bahsedildiği üzere, yüksek ezmeler yapabilmek için küçük çaplı merdaneler kullanılması gerektiği belirtilmişti. Merdane çapları küçüldükçe rijitlikleri (bükülmezlikleri) azalır. Bunun sonucunda, mekanik bombe ve yağ kontrolu ile düzeltilemeyecek kadar çok bükülürler. Bu sorunu aşmak için iş merdanelerinin arkalarına destek merdaneleri konularak "4-high mill" yani "4 katlı hadde" ortaya çıkmıştır (Şekil 4.9b) Yükü taşıyacak büyük destek merdaneleri olduğuna göre daha da küçük çaplı iş merdaneleri kullanılabilir. Bunun da bir limiti vardır çünkü iş merdaneleri düşey düzlemde eğildikleri gibi (ortası yukarıda kenarlar aşağıda) yatay düzlemde de eğilirler. Destek merdaneleri yatay düzlemdeki eğilmeyi önleyemezler. Bu nedenle bir sonraki adım her bir iş merdanesine 2 adet destek merdanesi vermektir. Buna da "6-high mill" yani "6 katlı hadde" denir. (Şekil 4.9c) Bu sayede iş merdanelerinin çapları daha da küçültülebilir ama yine de iş ve destek merdanelerinin birbirlerine oranlı ölçülerinden dolayı bir limit vardır (Şekil 4.10a).



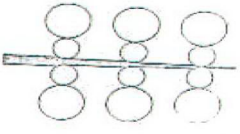
Şekil 4.10. a) 6'lı hadde , b) Sendzimir haddesi [22]

Daha küçük destek merdaneleri kullanarak ama bunların sayısını artırarak Sendzimir haddenin ana şekline ulaşılır (Şekil 4.10b).

Buraya kadar tarif edilen haddeler sadece bir grup merdaneden oluşuyorlar ve sadece bir pas yapabiliyorlar. Bunlar tek gruplu haddelerdir. İlave gruplar ile 2li-grup (Şekil 4.11), 3lü-grup (Şekil 4.12) haddeler oluşturulabilir.



Şekil 4.11. 2'li Grup Hadde

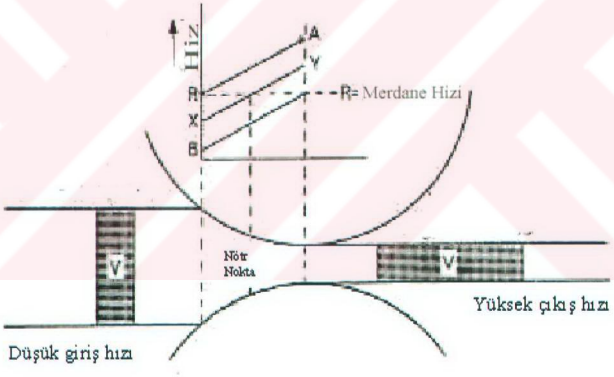


Şekil 4.12. 3'lü Grup Hadde

Metaller çatlamadan, çok fazla sıkıştırılabilirler. Metaller sertleştikçe sıkıştırılmaları için gereken basınç artar. Metal işlendikçe, (örneğin: haddelendikçe) sertliği artar. Haddelemeyle oluşan bu sertleşme hem işleme kolaylığı için hem de çatlamayı önlemek için isteğe göre tamamen veya kısmen tavlama işlemi ile kaldırılabilir.

Metal haddelenirken metal tabakalarının birbirleri üzerinden kayarak yer değiştirmesi ile deformasyon sağlanır. Dış tabakalar (alt ve üst) orta tabakalara göre daha çok haddelenerek daha ileri giderler. Bir metal bloğunun kenarına çizgiler çizilip, tek yönde haddeledikten sonra bu çizgiler incelendiğinde balık kuyruğu biçimini aldıkları görülebilir.

Metalin yüzeyi merdanenin yüzeyinde kaymaktadır. Bu, iş merdaneleri arasına giren **V** hacmindeki metalin nasıl değiştiği incelenerek ispatlanabilir (Şekil 4.13).



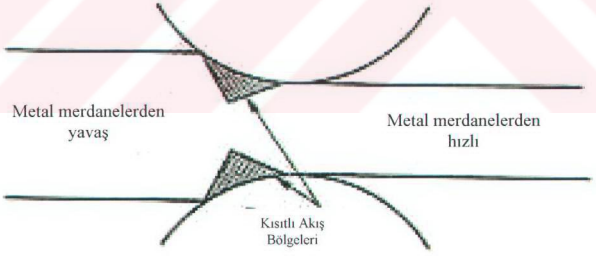
Şekil 4.13. Haddeleme teorisi [22]

Metalin hacmi değişmediğine fakat kalınlığı azaldığına göre boyu uzamak zorundadır. Bu da, merdanelerin arasından geçerken metal hızının artması anlamına gelmektedir. Eğer metal merdane hızı ile aynı hızda haddeye girerse haddeden daha hızlı çıkmak zorundadır (A Noktası). Bir başka deyişle, merdane hızı ile aynı hızda haddeden çıkarsa (R Noktası) o zamanda daha düşük hızda haddeye girmiş olmalıdır. (B Noktası) Pratikte metal haddeye daha düşük hızla girer (X Noktası) , daha yüksek hızla çıkar (Y Noktası). İki merdane arasında

"Nötr Nokta " dediğimiz bir noktada da metal, merdane ile aynı hızdadır. Bu noktadan(nötr nokta) önce metal, merdaneye göre giriş tarafına doğru kayar, bu noktadan (nötr nokta) sonra çıkış tarafına doğru (Y-R) hızıyla kayar. Bu kaymaya **"sürtünme"** karşı koyar.

Sürtünmenin, metalin hareket eden tabakaları üzerindeki etkileri bazı ilginç silindir basma deneyleriyle incelenmiştir. Silindirlerin baskı altında, üstten aşağı kadar aynı şekilde şişerek yüksekliğinin azalıp çapının düzgün bir şekilde artacağı beklenmekteydi. Fakat silindirlerin fıçı şekli aldığı görüldü. Bunun sebebi alt ve üstteki metal plakalar ile silindir arasındaki sürtünmenin silindirin alt ve üstündeki metal tabakalarının dışarı doğru hareketini kısıtlamasındandır. Bu tabakalar sırasıyla bir sonraki tabakanın dışarı doğru hareketini kısıtlarlar fakat harekete tamamıyla mani olamazlar. Bu yüzden her tabaka bir öncekinden daha çok dışarıya doğru hareket eder ve tam ortadaki tabakalar dışarı doğru en fazla hareket ederek fıçı şeklini oluşturur.

Bu koşullar merdanenin metali sıkıştırması ve metal tabakalarının hareketleri iş merdanelerinin arasındaki kıstırma bölgesinde de olduğundan bu bölgede kısıtlı akış bölgeleri de vardır (Şekil 14).

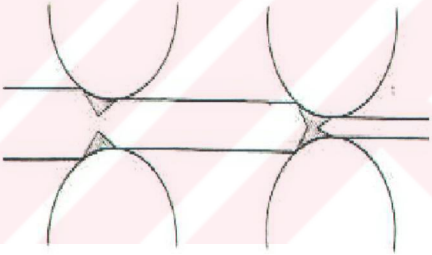


Şekil 4.14. Haddelemede kısıtlı akış bölgeleri [22]

Yağlama, pürüzlülüğün oluşturduğu sürtünmeyi ortadan kaldırır. Bunun içindir ki kalın malzeme işleyen haddede kaba, merdane, parlak merdaneden daha fazla ezme verir.

Merdaneler arasındaki metalin deformasyonu için gerekli basınç aşağıdaki etmenlere bağlıdır: Metalin sertliği, kısıtlı akış bölgelerinin büyüklüğü ; bu da dolayısıyla metal ve merdanelerin temas yüzeyine bağlıdır, kontrollü akış bölgeleri arasındaki mesafe ki bu, serbest akışa bırakılan metalin miktarını belirler, iş merdanelerinin kıstırma bölgesindeki yağlama miktarı.

Herhangi bir haddede metalin daha fazla inceltilemeyeceği bir aşamaya gelineceği biliniyor. Bu durum iki etkenin birleşmesinden dolayıdır: 1. Metal haddelendikçe sertleşir. 2. Metal inceldikçe kısıtlı akış bölgeleri birbirlerine yaklaşarak üst üste binerler (Şekil 15). Metalin deformasyona (incelmeye) direnmesini yenmek için daha fazla baskı gerekir. Baskı arttırıldıkça merdanelere binen yük artar ve merdaneler daha fazla düzleşirler. Düzleşme temas yüzeyini, dolayısıyla sürtünmeyi büyüterek baskı ihtiyacını arttırır. Bu bir kısır döngüdür baskıyı daha fazla arttırmak sadece merdane düzleşmesini arttırır ve daha fazla inceltme yapılamaz.

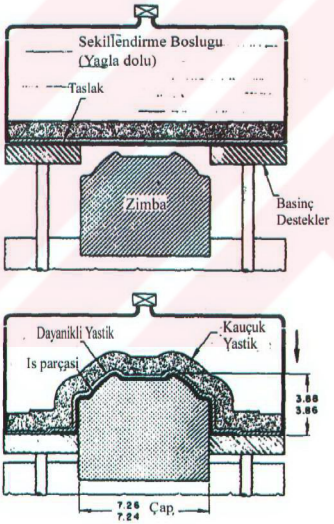


Şekil 4.15. Kısıtlı akış bölgelerinin üst üste binmesi [22]

4.2.5. Diğer Şekillendirme Çeşitleri

Önceki bölümlerde bahsedilen şekillendirme metotlarının yanında son günlerde geliştirilen ve uygulama alanları yeni yeni gelişen daha birçok şekillendirme çeşitleri vardır. Kauçuk-yastıkla şekillendirme, süperplastik şekillendirme, patlayıcı şekillendirme, elektrohidrolik şekillendirme, elektromanyetik şekillendirme, hidrolik şekillendirme, çekiçle şekillendirme, şahmerdanla şekillendirme, gofrajlama, kıvırma, presleyerek şekillendirme örnek olarak verilebilir [19].

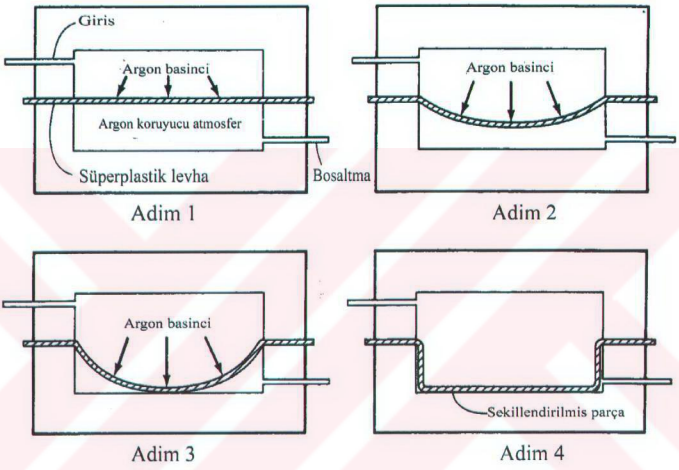
Kauçuk yastıkla şekillendirmede, esnek bir diyafram veya kauçuk-yastık ile katı bir zımba arasında malzemenin nihai şekil alması esasına dayanır. Alüminyum alaşımları birçok teknikle şekil almakta olup kauçuk yastıkla şekillendirmede de birçok değişik proses vardır. Bunlar; Guerin prosesi, Verson-Wheelon prosesi, Marform prosesi, Hydroform prosesi, SAAB prosesi, Demarest prosesi, ASEA Quintus prosesidir. Bu tekniklerde kullanılan alüminyum alaşımları derin çekme ve bükmede kullanılan alaşımlarla benzerlik gösterirler. Kauçuk yastık prosesinde kullanılan kauçuk yağlara ve şekillendirme yağlarına karşı iyi bir direnç, sertlik, çekme mukavemeti ve yansıma özellikleri göstermelidir. Bu şekillendirme tekniği uçak sanayi, yapı parçaları ve ışık reflektörleri, bina cepheleri, kalıplar, otomobillerin arka stop lambasının yatağının yapımında kullanılmaktadır. Şekil 4.16'da bu tip bir imalatın şematik olarak gösterilişi yer almaktadır.



Şekil 4.16. Kauçuk diyafram içinde bir şekillendirme işleminde 5457 H0 alaşımlı otomobil arka stop lambasının yatağının yapımı [19].

Süperplastik davranış, özellikle yüksek mukavemetli 7475 gibi 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında görülmektedir. Süperplastiklik için malzemeden istenen ince ve kararlı tane yapısıdır. Bu yapı alüminyum alaşımlarında hem statik hem de dinamik yeniden kristalleşme ile başarılabilir. Süperplastik alüminyum

alaşımlarının mikroyapıları çift fazlı veya genellikle çok az ikinci faz ihtiva eden tek fazdan oluşmaktadır. İkinci faz miktarı ince tane yapısının gelişim ve kararlığı için gereklidir. Süperplastik şekillendirme metodu; üfleme ile şekillendirme, vakumla şekillendirme, ısısal şekillendirme ve düfizyonla birleştirme şekillendirmelerini de içine almaktadır. Üfleyerek şekillendirmede gaz basıncı süperplastik diyafram üzerine yüklenerek malzemenin kalıp inde şekil alması esasına dayanır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Süperplastik şekillendirme için üfleyerek şekillendirme tekniğinin şematik gösterilişi [19].

Süperplastik şekillendirme esnasında iç yapıdaki mikro boşlukların şekillendirilmesi birçok süperplastik alüminyum alaşımında sorundur. Alaşımın temizliği, tane boyutu, akış hızı, deformasyon miktarı, şekillendirme sıcaklığı ve hidrostatik basınç boşlukları etkiler. Boşluk oluşumu şekillendirme esnasında yassı metalin arka tarafının üstüne basınç uygulanarak azaltılabilir. Bu tipte şekillendirilmiş alüminyum alaşımları özellikle uçak endüstrisinde kullanılmaktadır.

Patlayıcı şekillendirme özellikle alüminyum alaşımlarından yapılan uzay araçlarının parçalarının şekillendirilmesinde kullanılan bir yüksek enerji

şekillendirme yöntemidir. Genelde geleneksel bilinen metotlarla şekillendirilemeyecek karmaşık şekilli parçaların şekillendirmede uygulanır.

Elektrohidrolik ve elektromanyetik şekillendirme de bir çeşit yüksek enerji şekillendirme yöntemidir. Her iki yöntemde de şekillendirme enerji kontrollu olduğundan, boyutsal toleranslar çok dar limitlerde tutulabildiği gibi ekstra işlemler uygulanmayıp tek adımda yapılabildiğinden iyi bir yüzey kalitesi ve düşük maliyet elde edilir.

4.3. Şekillendirme Hataları

4.3.1. Eğme Hataları

Eğme sırasında; eğme ekseni boyunca oluşan gerilmelere neden olan teğet, çekme ve basma gerilmelerinden oluşan 3 eksenli gerilmelerin sonucu olarak kırışıksız eğme oluşur. Yüksek deformasyon bölgesindeki eğme eksenine paralel olan kısım – direkt olarak zımbanın altında kalan kısım – eğim kısmının giriş derinliği boyunca olan düzlem de sabit kalmaz. Levha kenarlarına yakın kısımlardaki deformasyonunu doğası gereği tabaka zımbadan önce bükülür. Bu yüzden tabaka zımba ile tüm giriş uzunluğu boyunca temas etmez ve tam bir temas oluşturmak için bölgesel baskı gereklidir. Bu durumda baskı sırasında oluşan bu davranışı düzeltmek için her ne kadar yarı kapalı kalıpta bükme bu kusuru azaltacak da olsa, kapalı kalıp bükme uygulamak gerekir.

İş parçaları genel olarak kesme işlemiyle boyutlandırılırlar. Kesilmiş kenarlar özellikle kenarlar etrafında genelde zayıf yüzey kalitesine ve oldukça yüksek deformasyon sertleşmesine sahiptirler. Eğer maksimum efektif kayma gerilmesi ve maksimum eğme deformasyonu toplamı, işlenen malzemenin çatlak deformasyonunu geçerse; eğme yayının dış kenarları boyunca çatlak teşekkül edecektir. Eğer böyle bir çatlak tolere edilemezse, kenar kısımlarındaki deformasyon sertleşmesi eğme işlemi öncesinde tercihen haddelenerek giderilebilir. Ayrıca deformasyon sertleşmesinin tavlama işlemi ile giderilmesiyle kenar çatlağı tehlikesinin elimine edilebileceği bilinmektedir.

Tabaka metaller genelde ekli ve kenar baskısı şeklinde eğilirler. Bu operasyonlarda parçanın uçlarının arasındaki nihai açının 0° olduğu, 180°C lik eğme işlemi tatbik edilir. İki tabakanın uçlarının bir araya getirilmesi işlemi olan

ek işlemi, daima sınırlı bir eğme iç çapı içerir. Diğer yandan kenar baskısı, tabakanın kendi üzerine katlandığı böylece iç eğme açısı sıfıra yaklaştığı ve 180°C lik eğme işlemlerinin en zor olandır. İlk adım sınırlı bir çaplı zımba içeren ön-eğme işlemidir. Tipik ön-eğme işlemi V-kalıp ve hava ile eğme veya katlamadır.

Eğme işlemi sırasında gözlenen diğer bir hatada geriye yaylanma olayıdır. Geri yayınma oranının K (Eşitlik 4.9) işlem malzemesine ve iç eğme yarı çapının geriye yaylanma olayı sonra oluşan yarı çapa oranına bağımlılığı görülmektedir. Saç kalınlığındaki değişim (DIN 1543 ve 1544' e göre ince saçlar için %15-20), uygun eğme yarıçapının artmasıyla K oranını önemli ölçüde etkilemektedir [21].

$$K = \frac{r_u}{r_{u,r}} = \frac{r_i + s_0/2}{r_{i,r} + s_0/2} \tag{4.9}$$

4.3.2. Derin Çekme Hataları

Üretim sahası oldukça geniş olan derin çekme işleminde; tezgah özellikleri, çalışma parametreleri, kalıp ve zımba konstrüksiyonu ile kullanılan levha özelliklerinin neden olduğu birçok problemle karşılaşılmaktadır. Bu problemleri bir tek nedene bağlamak çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Zira birden fazla parametre, hataların oluşumuna aynı anda katkıda bulunabilmektedir. Buna rağmen, birinci derecede etkili olan nedenleri dikkate alarak, derin çekme problemlerini; teçhizat ve çalışma parametrelerinden kaynaklanan problemler ve kullanılan levha malzeme özelliklerinden kaynaklanan problemler olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür [5].

Birinci grup derin çekme hataları, derin çekme yöntemiyle imal edilen kabın tabanında ve/veya flanş kısmında çatlak ve kopmalar, üst kenar veya flanşta buruşma, yan yüzeylerde lokal incelmeler, flanş veya gövdede radyal çatlamalar olarak karşımıza çıkmaktadır [5].

Bu hatalar; büyük ölçüde kalıp ve zımba konstrüksiyonu, taslak kenarına uygulanan baskı kuvveti, derin çekme hızı, kalıp-zımba açıklığı, yağlama, mamul ürün ve boyutları, redüksiyon oranı gibi tezgah ve işlem parametrelerine bağlı olup, inceleme kapsamına alınmamıştır. Derin çekme işleminde çok sayıda kusur ve hatadan bahsedilmektedir.

4.3.2.1. Kulaklanma

Sıkça karşılaşılan derin çekme problemlerinden birisi olan kulaklanma, derin çekilebilirlik – plastik anizotropi konusunda da belirtildiği gibi, derin çekilen kabın ağız kısmının girinti ve çıktılardan oluşan bir yapı göstermesidir. Bu girinti ve çıkıntıların her biri kulak olarak isimlendirilmektedir.

Derin çekme sonunda iki, dört, altı sekiz gibi değişik sayılarda kulak oluşabilse de, en çok rastlanılan dörtlü kulak oluşumudur [23]. Kulakların hadde yönüne göre pozisyonunu dikkate alındığında başlıca iki tip kulaklanmadan söz edilmektedir [5,16].

a) 0^0 / 90^0 Kulaklanma

b) 45^0 Kulaklanma

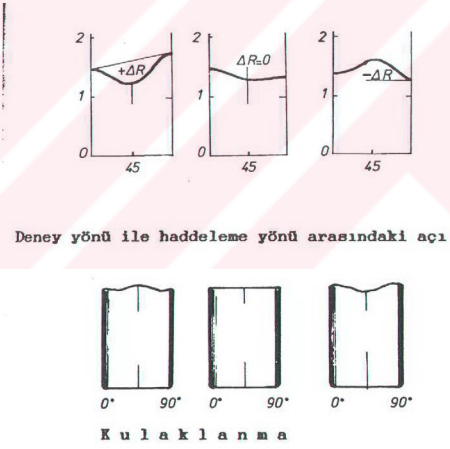
Kulaklanmanın temel nedeni, taslak olarak kullanılan levhanın çeşitli üretim kademelerinde ortaya çıkan tekstür oluşumundan kaynaklanan anizotropik karakteridir. Tekstür oluşumu dökümden başlayarak her üretim basamağında görülebilmekte ve kaynak prosese göre adlandırılmaktadır (hadde tekstürü, tavlama tekstürü, vb.). Malzeme yapısında meydana gelen tekstürün yönü ve miktarı anizotropi derecesini, buna bağlı olarak da kulaklanmanın pozisyon ve büyüklüğünü belirlemektedir [5,24].

Üretim süreci içerisinde, bir önceki işlem basamağında oluşan yapı ve tekstür, bir sonraki proseste oluşacak tekstürü etkilemektedir. Bu nedenle, son mamuldeki anizotropiyi minimum düzeye indirebilmek için, baştan itibaren her işlem basamağını denetim altına almak ve bir sonraki işlem basamağında oluşacak anizotropiyi azaltıcı veya değişik kademelerde birbirini yok eden tekstürik yapıların oluşmasını sağlayıcı tedbirler almak gerekmektedir [5].

Anizotropik özellik nedeniyle taslağın belli yönlerde daha kolay deforme olarak uzaması sonucu oluşan kulaklanma, üründe/mamulde aşırı kenar kesimi gerektireceğinden üretim verimini de düşürmektedir. Daha aşırı hallerde ise, kulaklar arasındaki çukur bölgeler istenilen kap yüksekliğine ulaşamayacağından ürünün hurdaya ayrılmasına yol açabilmektedir Kulaklanma, ortalama dikey anizotropi değerine bağlı olup, kulak formunun da düzlemsel anizotropi değerinin bir fonksiyonu olduğu bazı araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir.

Çimenoğlu ve Kayalı (1984), alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirliğini n, m, r değerlerine göre incelemişler ve bu faktörlerin şekillendirme sınır diyagramları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yüksek deformasyon sertleşmesi üssü değeri, yüksek deformasyon hızı duyarlılığı üssü ve yüksek ortalama dikey anizotropi değerleri şekillendirme diyagramındaki üniform şekil değiştirme değerlerini ve alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilme kabiliyetini artırdığını savunmaktadırlar [25].

Kulaklanmanın meydana gelip gelmeyeceği düzlemsel anizotropi katsayısı (ΔR) ile tespit edilir. ΔR=0 iken kulaklanma olayı görülmez. ΔR<0 ise 45° lik yönlerde ΔR>0ise 0° ve 90° lik yönlerde kulak oluşumu görülür. Kulaklanmanın temel nedeni, taslak olarak kullanılan levhanın çeşitli üretim işlemi kademelerinde ortaya çıkan tekstür oluşumundan kaynaklanan anizotropik karakterdir. Tekstür teşekkülü dökümden başlayarak her üretim basamağında oluşabilmekte ve kaynak prosese göre; hadde tekstürü, v.b. olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4.18. ΔR'ye bağlı olarak kulak oluşumu [5].

4.3.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Derin çekme işlemine tabi tutulan malzemenin, derin çekme işleminden sonra özellikle fazla deformasyona uğrayan bölgelerinde görülen yüzey pürüzlenmesi, portakallanma olarak adlandırılmaktadır. Portakal kabuğunu andıran görüntüsü ile ürünün ticari değerini azaltması yanında, malzemenin derin çekilebilirliğini de etkileyen bu hata, kullanılan levhanın iri taneli olması nedeniyle ortaya çıkmaktadır [5].

Yüzeydeki tanelerin deformasyonu iç kısımlardaki taneler gibi kısıtlı olmadığından, iri taneler birbirinden bağımsız deforme olarak yüzeyde kabartılara yol açmaktadır [23].

Gözle görülebilir derecede yüzey pürüzlülüğüne yol açabilecek tane boyutu; deformasyon miktarı, alaşımın yapısı ve ürün cinsine göre değişmektedir. Ancak, bir genelleme yapmak gerekirse, yüzey kalitesi açısından çok hassas parçaların üretilmesinde tane boyutunun en fazla 0,04 mm olması tavsiye edilmektedir [5].

Bazı araştırmacıların 1100 alüminyum üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda, yaklaşık %30 deformasyonda 80 mikron'a kadar artan tane boyutu ile yüzey pürüzlülüğü arttıktan sonra sabit kalma eğilimi gösterdiği görülmüştür [26].

4.3.2.3. Lüders Çizgileri

Genel olarak, Al-Mg alaşımı levhaların derin çekilmesinde karşılaşılan lüders çizgileri, tavlanmış levhalardaki akma uzaması ile oluşan bir tür yüzey pürüzlenmesi şeklindedir. Çekme esnasında bazı bölgelerde çok az deformasyon meydana gelirken, tatbik edilen yükle 45^0 açı yapan ve kesme gerilmelerinin maksimum değere ulaştığı doğrultularda bölgesel akma meydana gelerek yüzeyde çukurlaşmalar meydana gelmektedir. Deformasyonun devam etmesi ile büyüyerek yaygınlaşan bu çukurlaşmalar, derin çekilen kabın yüzeyinde iskelete benzer bir dağılım gösteren pürüzlü bölgelerin oluşmasına yol açmaktadır. Uygulanan gerilmenin basma gerilmesi olması halinde, pürüzlü alanlar çıkıntılar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Çeşitli tipleri olan lüder çizgilerinin genel özelliği, istenmeyen kaba ve pürüzlü bir yüzey oluşturmasıdır [5].

4.3.2.4. Looper Çizgileri

Derin çekmede karşılaşılan yüzey hatalarından birisi olan looper çizgileri, derin çekilen kabın yüzeyinde oluşan halka (loop) biçimli izler olarak tanımlanmaktadır. Metal yapısındaki düzensizliklerin yol açtığı üniform olmayan deformasyon, bu tür bir yüzey hatasına yol açmaktadır. Yaygın olan yapı düzensizliklerinden birisi, uzamış (ghost) tanelerdir. Sıcak hadde veya ara tav esnasında oluşan iri taneler, daha sonraki haddeleme işleminde fiber şeklinde uzamaktadır. Son tavlama esnasında bu fiberler ya yaklaşık aynı oryantasyondaki küçük taneler kolonisi şeklinde yeniden kristalleşmekte ya da hiç kristalize olmadan kalmaktadır. Looper çizgilerine neden olan diğer önemli bir yapı düzensizliği de, özellikle dendritik segregasyon türü ingot segregasyonudur [5].

4.3.2.5. Kırışmalar

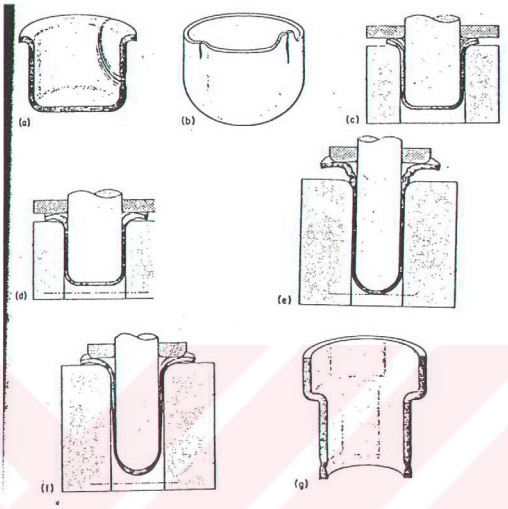
Derin çekme işleminde kırışma olayı, sıkıştırma kuvvetinin yeterli olmaması, kalıp veya zımba eğrilik yarıçapının aşırı büyük olması, zımba ile kalıp arası mesafenin gereğinden büyük olması, taslak çapının gereğinden büyük olması veya malzemenin çok ince olması hallerinde görülmektedir. Uygun sıkıştırma basıncı ve kalıp geometrisi ile kırışma olayı önlenebilmektedir [16].

4.3.2.6. Çatlamalar

Metalik sacların derin çekme işleminde çatlama olayı, genellikle zımba eğrilik yarıçapının hemen üstündeki bölgede meydana gelmektedir. Malzeme özelliklerinin zayıf olması, zımba veya kalıp eğrilik yarıçapının küçük olması, sıkıştırma basıncının yüksek olması, derin çekme oranının büyük olması, yağlama işleminin uygun olmaması, zımba ile kalıp arasındaki mesafenin küçük olması bu tür bir hataya neden olmaktadır. Zımbanın uyguladığı kuvveti artırıcı rol oynayan bu faktörler, malzemenin söz konusu kritik bölgede incelerek kopmasına yol açmaktadır. Zımbanın uyguladığı kuvveti azaltacak önlemler ve daha kaliteli malzeme kullanımı bu hatayı önleyecektir [16].

Derin çekme işleminde çatlama, bazen çatlağın dış çevresinde veya elde edilen kabın üst bölgesinde görülmektedir. Bu olay, genellikle çevresel basınca karşı koyamayacak zayıf özelliklere sahip malzemelerin derin çekilmesinde ortaya çıkmaktadır. Taslak çevresindeki çentik gibi hataların olması da gerilme konsantrasyonuna neden olacağından, çatlamalar yol açabilmektedir [16].

Derin çekme işlemlerinde karşılaşılan hatalara ait örnekler Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 4.19. Derin çekme işleminde karşılaşılan hatalara ait örnekler [5].

a) Çatlama, b) Kulak oluşumu ve taslaktaki çentiğin çatlağa dönüşümü, c) Kırışma, d) Yığılma, e) Yeniden derin çekmede kap derinliğinin fazla oluşundan dolayı metal birikmesi, f) Yeniden derin çekme işlemi için kap derinliğinin azlığı, g) Duvar kalınlığındaki bölgesel incelme

4.3.3. Gererek Şekillendirme Hataları

Gererek şekillendirmede, germe ağızlarına yakın ve kalıpla henüz temas etmemiş kısımlarda çatlama görülebilir. Bunun temel sebebi, uygulanan aşırı yüktür. Bu tür bir çatlak yalnızca iyi şekillendirilebilir malzemelerde görülür. Bunlara ilaveten, çenelerin hareketinden dolayı çene kenarlarından ve çenenin içindeki kısmında gerilim konsantrasyonu mevcuttur. Bu tür çatlaklar genelde gererek şekillendirme işleminin sonuna doğru görülür ve malzeme yinede kullanılabilir.

Oluşabilecek diğer hatalar gererek şekillendirme kalıbının zirve noktasında görülür. Gevrek malzemeler yalnızca kalıbın şeklini alabildiklerinden gevrek kırılma nedeniyle koparlar. Sünek malzemelerse daha sonra tepe noktasındaki boyun vermeden dolayı koparlar. Boyun verme nedeniyle oluşan bir hata kaynağı araştırılırken şekillendirme limit diyagramları kullanılabilir. Eğer gerekli olan

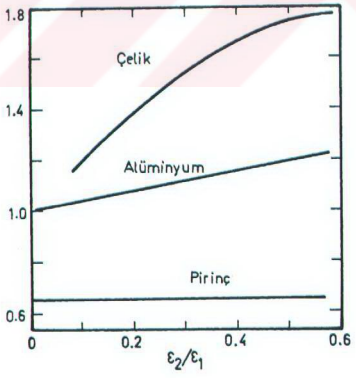
deformasyon çok küçükse, malzemenin etrafı elastik deformasyonlarla çevrelenmiş bölgesel akma bölgelerinde gözle görülebilir kayma bantlarına rastlanır. Bu lüders bandları çok farklı akma noktasına sahip malzemelerde görülür [21].

4.4. Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD)

4.4.1. Genel Bilgi

Şekillendirme sınır diyagramları (ŞSD), kavram olarak ortaya atıldığı tarihten (Keler-Backofen 1966, Goodwin 1968) başlayarak endüstride yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Diyagram, sadece karşılaşılan sorunların çözümünde değil, bunun da ötesinde etkin kalıp tasarım ve malzemenin etkin kullanımı için başvurulan bir araç niteliği kazanmıştır [27].

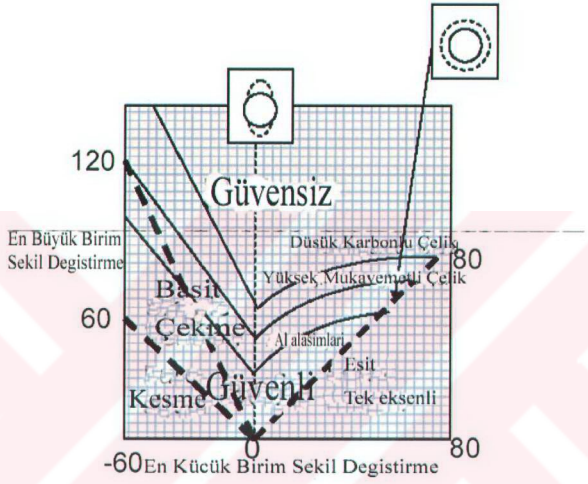
1963'de Keeler ve Backofen'in çift eksenli gerilen levhalarda büzülme üzerine yaptığı çalışma, bugün şekillendirme sınır diyagramı diye bilinen büzülme kriterinin gelişmesine yol açmıştır [27]. Bu araştırmacılar, çelik, bakır, pirinç ve alüminyum gibi çeşitli malzemeleri zımba altında germişler ve elde edilen sınır deformasyonların, Şekil 4.20'de görüldüğü gibi çift eksenlilik arttıkça yükselen bir eğilim gösterdiğini tespit ettiler.



Şekil 4.20. Çelik, 1100 alüminyum ve 70/30 pirinç için düzlemde germede sınır deformasyonlar [5].

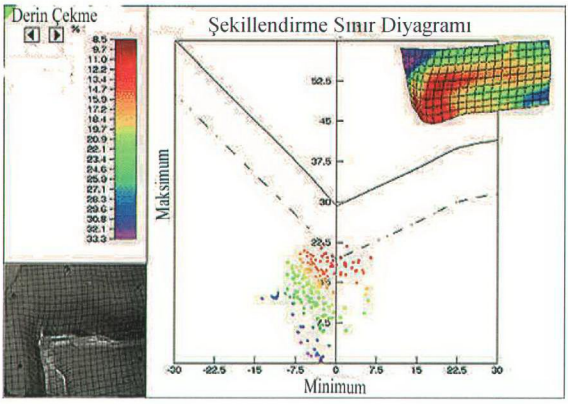
Daha sonraları Goodwin yassı metal şekillendirmede kırılmanın anlaşılabilmesi için çok değerli çalışmaları ile katkıda bulunmuştur. Şekillendirme eğrisi deneysel

olup şekillendirilen metal yüzeyinde görülen kırılma veya bölgesel incelmelerdeki ilk yüzey deformasyonlarının sınır kombinasyonlarını açıklamaktadır. Şekil 4.21'de şekillendirme sınır eğrisi için tipik bir örneği göstermektedir. Eğri yassı metalde şekillendirme esnasında meydana gelen büyük ve küçük eksenlerdeki şekillendirme boşluğu ilkesine dayanarak çizilmiştir.



Şekil 4.21. Şekillendirme boşluğu ilkesine göre tahmini şekillendirme sınır eğrisi [20]

Keeler-Goodwin Diyagramı olarak da bilinen şekillendirme sınır diyagramına (ŞSD) örnek olarak otomobil yan yüzeylerinde kullanılan SPRC35-R yüksek mukavemetli çeliğin şekillendirme sınır diyagramı Şekil 4.23'de gösterilmektedir. Bu tür gösteriliş şekli hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar tarafından tercih edilmektedir.



Şekil 4.22. Otomotiv sektöründe kullanılan SPRC35-R yüksek mukavemetli çeliğin şekillendirme sınır diyagramı [28].

Şekillendirme sınır diyagramlarının en önemli görevi fabrikada bir teşhis, analiz ve problem çözme aracı olarak kullanılmasıdır. Diyagramların uygulamaya konulması çalışılan parça üzerinde yapılacak gerilme analiziyle sağlanır. Kimyasal yöntemlerle parçaya dağlanan daire çizgiler deformasyonların direkt okunmasını sağlarlar ve işi fevkalade kolaylaştırırlar. Şekillendirme sınır diyagramı, belirli bir deformasyon oranı ve maksimum deformasyon için ne kadar güvence payı olduğunu gösterir. Güvence payı pek fazla değil ise, bunu kabul edilebilir bir risk düzeyine indirmekle maliyet düşürülebilir. Pek küçük ise, zaten bir problem mevcuttur ve burada amaç hatalı parça yüzdesini azaltmaktır. Şekillendirme diyagramının düşük noktası düzlemsel deformasyonunu, kaçınılması her zaman mümkün olmasa bile istenmeyen bir deformasyon türü olarak simgeler. Bu deformasyon türünden her iki yönde uzaklaşmak, büzülme ve kırılmadan önce daha fazla deformasyon elde edilmesini sağlar.

Şekillendirme Sınır Diyagramları'nda araştırmacılardan Keeler $\varepsilon_2/\varepsilon_1 > 0$ bölgesinde çalışmış ve daha sonra bulgularını yassı levha şekillendirme işlemlerindeki uygulamalarda kullanarak yol göstericilik yapmıştır. $\varepsilon_2/\varepsilon_1 < 0$ bölgesindeki ilk ölçümleri ise Goodwin yapmıştır [27]. Daha sonra Mellor farklı test teknikleri hesaplayarak, diyagramın sol tarafı ($\beta = \varepsilon_2/\varepsilon_1 < 0$) için tüm test tekniklerinin hemen hemen aynı sonucu verdiği sonucuna varmıştır. Ancak, her iki birim şekil değiştirmenin pozitif olduğu çift eksenli germe bölgesinde $\beta > 0$ ve

sınır birim şekil değiştirmeler uygulanan test tekniklerine bağlı olduğu soncuna varmıştır. Mellor, gosh ve Hecker test tekniklerini iki grup altında toplamıştır:

a) Düzlemsel test metodları,

b) Düzlem-dışı test metodları

Azrin ve Backofen düzlemsel test metotlarını uygulayıp birim şekil değiştirme eğimini ve sürtünme efektlerini elimine ederek birçok metalin Şekillendirme Sınır Diyagramları'nı açıklamışlardır. Çift eksenli germede Al ile söndürülmüş düşük karbonlu çelik ve alüminyum levhalar için β'nın artmasıyla eğrinin yükseldiğini bulmuşlardır.

Şekillendirme sınır diyagramının elde edilmesinde temelde 3 tür deney uygulanır:

a. Zımbada germe,

b. Düzlemde germe,

c. Hidrolik şişirme

Zımba ile germe de levha iki kalıp arasında kenarlarından sıkıca tutturulur ve yarı küresel rijit bir zımba üzerinde gerilir. Belirgin, gözle görülebilir bir büzülme oluşunca, büzülme bölgesinde ve büzülmenin dışındaki bölgede deformasyonlar önceden levha üzerine dağlanan küçük çaplı dairelerdeki çap değişimleri ölçülerek tespit edilir.

Düzlem germede ise, kenarlarından tutturulmuş levha, içi kasnak gibi oyulmuş bir zımba üzerinde zımba ile dokunma olmaksızın deforme edilir. Böylece, zımbada germedeki sürtünme ve eğme etkileri ortadan kalkar. Şekillendirme sınır diyagramları hidrolik şişirme deneyi ile elde edilebilirler.

Zımbada germe ve hidrolik şişirme işlemlerinde ihtiyatlı davranmak gerekir. Bunun nedeni, sürtünme ve eğme etkilerinden dolayı (hidrolik şişirmede kenarlarda deformasyonun serbest olmasından dolayı) malzemede deformasyonun başlamasıyla birlikte deformasyon dağılımlarının oluşmasıdır. Deformasyon dağılımının oluşmasına karşın en fazla incelen bölge zımbada deformasyon sırasında kenarlara doğru yer değiştirir ve malzemenin çeşitli noktaları maksimum deformasyona tabi olur. Düzlem germede ise, deformasyon üniformdur ve deformasyon en büyük hatada yoğunlaşır. Böylece zımbada germe daha yüksek şekillendirme sınır eğrileri verir. Hidrolik şişirmede de, zımbada germe olduğu

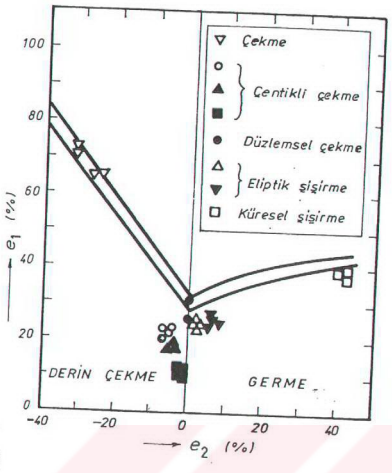
gibi geometrik engellerden yüzünden büzülme oluşması sınırlandırılmıştır. Gosh hidrolik şişirme ile elde edilen şekillendirme diyagramlarının zımbada germeyle elde edilenlerle hemen hemen aynı olduğunu göstermiştir [5].

Pratik yönden zımbada germede elde edilen şekillendirme diyagramları daha geçerlidir. Bu yöntemle, rijit kalıplarda yapılan levha zımbalama işlemi daha iyi canlandırılır. Laboratuvarda zımbada germe yöntemiyle elde edilen Şekillendirme sınır diyagramları ile gerçek işlemlerdeki sınır deformasyonlar arasında uyum mükemmeldir.

Levha şekillendirmede (Şekillendirme Sınır Diyagramları) ŞSD faydalı deformasyonu belirler. ŞSD'nin yüksekliği ve genel şekli malzemenin şekillendirilebilirlik düzeyinin bir göstergesidir. Her ne kadar ŞSD'nin yüksekliği ve genel şekli ile malzemenin temel mekanik özellikleri arasında tam bir bağıntı kurulamamışsa da, yüksek şekillendirilebilirlikte deformasyon sertleşmesi kapasitesinin ve deformasyon hızı duyarlılığının son derece önemli olduğu görülmüştür.

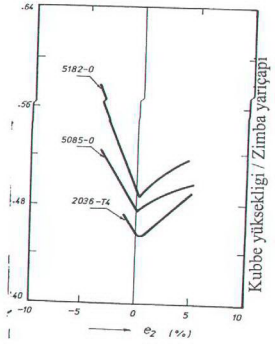
Fabrikada, problem teşhis, analiz ve önlemede, yeni işlemlerin tasarımında ve malzeme levha şekillendirilebilirliğini değerlendirmede fevkalade önemli bir araç olmasına karşın ŞSD gerçek bir malzeme özelliği değildir. ŞSD düzeyi ve şekli deformasyon türünden (zımbada germe-düzlemde germe), deformasyonun izlediği çizgiden ve levha kalınlığından etkilenmektedir. Dolayısıyla, zımbada germe ve düzlemde germe deneylerinden farklı Şekillendirme sınır diyagramları elde edilmektedir.

Öztürk, Orhaner ve Kalay (1988), Etial-52 alüminyum alaşımı levhaların şekillendirilebilirliği üzerine yaptıkları deneysel çalışmalar sonunda; 2,28 mm ve 1,62 mm kalınlıktaki Etial-52 Al-Mg alaşımı levhaların incelmeye karşı direncini yansıtan R değerinin düşük ve dar aralıkta olduğunu, bu nedenle çalışılan malzemenin derin çekilebilme özelliklerinin sınırlı olacağını, diğer taraftan, Etial-52 Al-Mg alaşımı levhalarda deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerlerinin yüksek olduğunu ve bu nedenle deneylerde kullanılan malzemenin germe işlemlerine özellikle uygun olacağını belirtmektedirler [5].



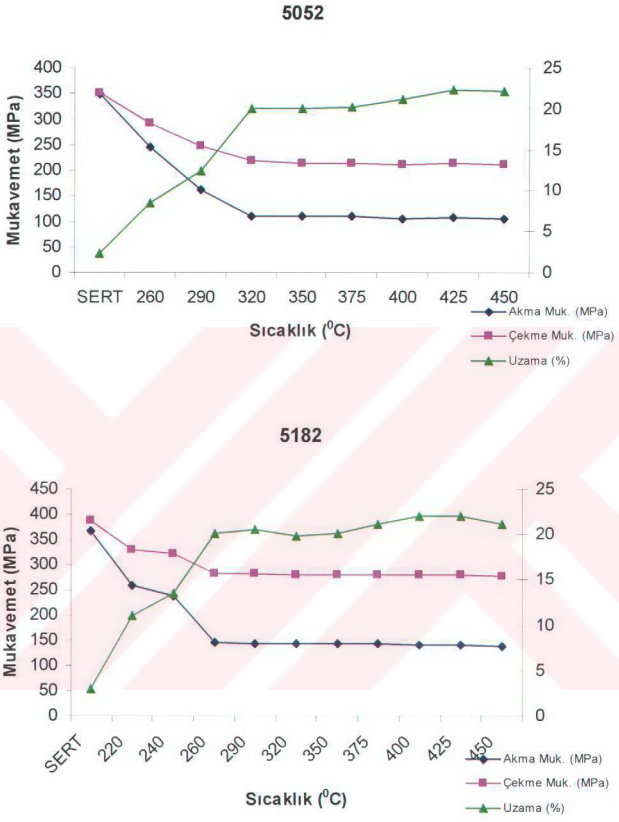
Şekil 4.23. 2,28 mm kalınlıklı ETİAL-52 levha malzeme için belirlenen şekillendirme diyagramı [5].

Gosh (1975), 2036-T4, 5085-0 ve 5182-0 levha alüminyum alaşımlarının şekillendirme diyagramlarını oluşturmaya çalışmıştır. Çalışmalarında, 101,6 mm çapında küresel zımba ile farklı genişliklerde (155 mm, 127 mm, 114 mm, 102 mm) ve 155 mm uzunluktaki numunelere germe işlemi uygulanmıştır. Numunelerdeki maksimum çökertme yüksekliği (kubbe yüksekliği)/Zımba yarıçapı oranı ile minimum deformasyon miktarı arasındaki değişimleri tespit ederek, Şekil 4.24'deki gibi şekillendirme diyagramlarını elde etmiştir [5].



Şekil 4.24. 2036-T4, 5085-0 ve 5182-0 Alüminyum alaşımları için çizilen kubbe yüksekliği/Zımba yarıçapı – minimum deformasyon oranı eğrileri [5].

Dündar (2001), sürekli döküm yöntemi ile dökülen 5052 ve 5182 alaşımlarının yeniden kristalleşme davranışlarını incelemiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. 5052 ve 5182 alüminyum alaşımların yeniden kristalleşme davranışları [29]

Slamova (2002), 5182 ve 5754 alaşımlarının geleneksel yöntemlerle dökülmüş malzemelerini değişik prosesler altındaki anizotropik özelliklerini ve şekillendirme kabiliyetlerini incelemiştir. 5182 ve 5754 alaşımlarının hemen hemen aynı özellikler gösterdiğini ancak 5182 alaşımının 5754'e göre biraz daha iyi şekillenebilir olduğunu belirtmiştir [30].

4.4.2 Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Çizilmesi

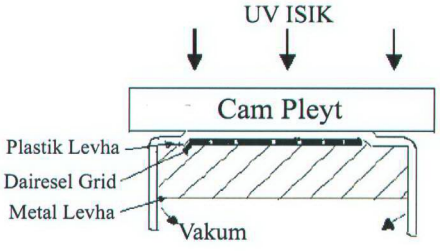
Şekillendirme sınır diyagramı, değişik deformasyon çeşitleri için malzemede elde edilebilecek en yüksek deformasyon miktarını göstermektedir. Şekil 4.21'deki tipik Şekillendirme sınır diyagramı yer alan eğrinin alt bölgesi ait olduğu saçta şekillendirmenin mümkün, üst bölgesi ise şekillendirmenin mümkün olmadığı bölgeleri göstermektedir.

Eğri, sınır deformasyon miktarlarını yatay ve düşey eksenler yardımıyla vermektedir. Yatay eksen sac üzerinde, sacın belirli bir bölgesinde oluşan en küçük % deformasyonu dikey eksen ise yine aynı bölgede birinciye dik doğrultuda oluşan büyük % deformasyonu göstermektedir. Eğrinin sol tarafı derin-çekme bölgesi, sağ tarafı ise germe bölgesini gösterir. Dikey eksen çevresi derin çekme ve germenin eşit ağırlıklı olduğu bölgedir. Görüldüğü gibi bu orta bölgede şekillenebilirlik diğer bölgelere oranla daha düşüktür.

4.4.2.1. Ağ dokusu (grid patern) oluşturma metodları

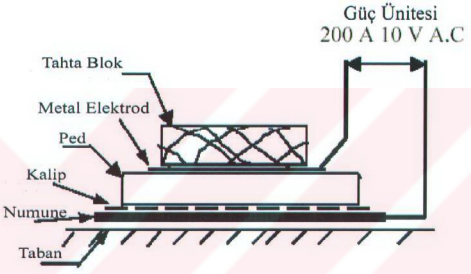
Malzemenin üretim şartlarındaki davranışını inceleyebilmek için plastik şekil değiştirme analizlerine gerek vardır. Bu amaçla, metalik sac yüzeyine, değişik yöntemlerle dairelerden oluşan bir ağ (grid) çizilir. Dairesel ağ yapıları normalde iki farklı yol ile yapılır. Bunlar elektro kimyasallar veya fotokimyasallardır. Her iki proseste kendine has avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

Fotokimyasal dağlama, ağ yapısı oluşturmada kesin bir metot olarak; 1-Metal yüzeylerin temizlenmesi, 2-Işık direnci ile kaplama, 3-UV ışıkları ile elimine etme,4-Geliştirme, 5-Dağlama, 6-Yüzey temizleme adımları uygulanır.



Şekil 4.26. Fotokimyasal dağlama ile grid oluşturma [31]

Elektrokimyasal dağlama metodu çok çabuk ve ağ yapılarının kolay uygulanması sebebiyle en çok tercih edilen metottur. Elektrik şablon temizlenmiş taslak üstüne yerleştirilir. Elektrolit ile taslağın üstündeki ped yerleştirilir. Tahta blok (veya değişik seramik malzeme blokları) meta şekilde gösterildiği gibi üstüne konur. Elektrottan taslağa 14 volt uygulanır. Şablon boyut ve hat yoğunluğuna bağlı olarak akım 15-200 amper arasında değişir. Basınç elektrot üstüne uygulandıktan sonra sıkıştırılır ve elekrolit şablona doğru hareket eder ve taslakla ağ dokusu elektro kimyasal olarak dağlanır. Taslağın dağlanmasından sonra nötralize edilmiş çözelti ile yıkanır.

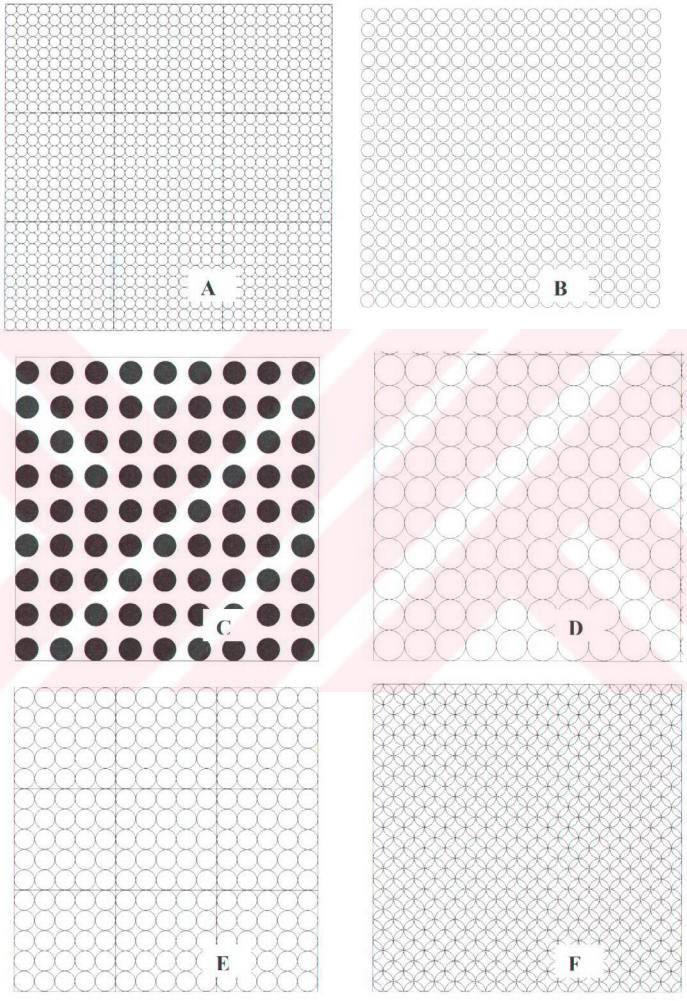


Şekil 4.27. Elektrokimyasal dağlama ile grid oluşturma [31]

Ağ yapısı oluşturma ile deformasyon analizi çok kullanılan bir metod olup metal şekillendirmede yaşanan sorunların çözümünde etkin olarak kullanılmıştır. Yassı metal şekillendirildiğinde metal yüzeyi farklı gerilimlere maruz kalır. Bu gerilmeler uniform olmayan deformasyonlarda parçanın şekillenmesi ile sonuçlanır. Böylece yüksek deformasyon bölgelerinde mümkün olduğunca küçük, şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Bu kırışıklığa veya kırılmaya sebebiyet verir. Ağ yapısı oluşturma metodu ile yüksek deformasyon bölgeleri kolayca tanımlanabilir. Şekillendirme prosesi öncesi ağ yapısı ile işaretlenen yassı metal istenilen şekilde deforme edildikten sonra deformasyon dağılımı gözlenebilir ve deformasyonun kritik bölgeleri şekillendirme sınır diyagramı ile bulunması sağlanır.

Şekillendirme Sınır Diyagramlarının tespitinde, yuvarlak ağ yapısı dokularının birçok çeşidi kullanılmaktadır. Ağ yapısı örnekleri Şekil 4.28'de gösterilmektedir. Örnek olarak, birbirine temas eden bir kare içerisinde veya birbirine temas etmeyen daireler verilebilir. Deformasyon sonrası yuvarlak ağ yapıları elips

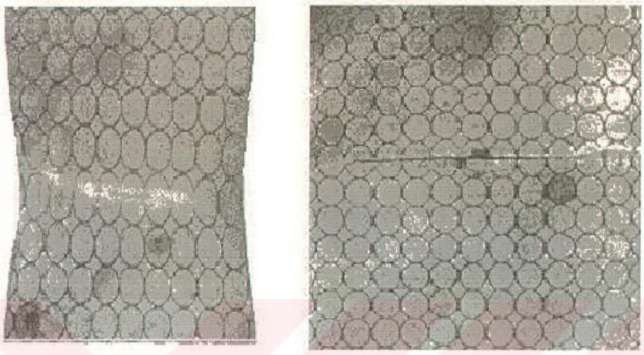
şekline dönüşür. Deformasyonların yönü elipssin büyük ve küçük ekseni ile gösterilir.



Şekil 4.28. Ağ yapısı örnekleri (A : Kare içinde tek dairesel ağ yapısı, B : Birbirine temas etmeyen dairesel ağ yapısı, C : İçi dolu dairesel ağ yapısı, D : Büyük çaplı dairesel ağ yapısı, E : Büyük kare içinde dairesel ağ yapısı, F : Birbirini kesen dairesel ağ yapısı [32]

4.4.2.2. Şekillendirme sonrası grid ölçümü

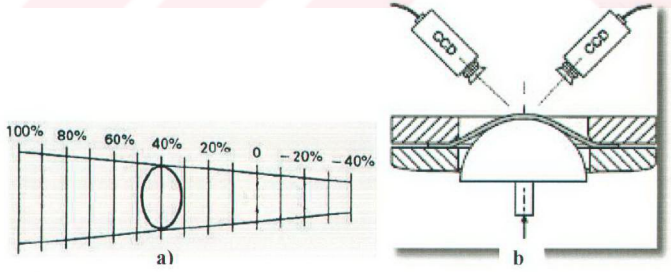
Yassı metal şekillendirildikten sonra işaretlenmiş daireler farklı boyutlardaki elipslere dönüşeceklerdir (Şekil 4.29).



A) Tek Eksenli Germe **B)Çift Ekenli Germe**

Şekil 4.29. Yassı metal şekillendirme sonrası ağ yapılarının aldığı örnek formlar [27]

Şekil değiştiren ağ yapıları birim şekil değiştirme miktarlarını simgelediğinden ağ yapılarının boyut ölçümü Myler cetveli kullanarak, portatif uygun büyütmelere sahip skalalı araçlarla veya son dönemlerde deformasyonun olduğu bölgeye kameralar yerleştirerek bilgisayar ortamında boyutlu modellemelerde otomatik olarak tespit edilirler (Şekil 4.30).



Şekil 4.30. a) Elipslerin ölçümü için Myler cetveli, **b)** Kamera ile otomatik ağ yapısı ölçüm düzeneği [28]

Diğer metod olan mikroskop altında maksimum ve minimumdaki uzunluk değişimleri ölçülerek Formül 4.10 ve 4.11 yardımıyla Şekil 4.31'de görülen elips

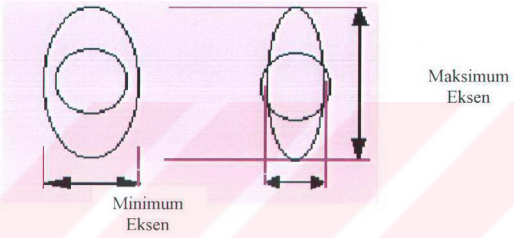
formları üzerinden maksimum ve minimum birim şekil değiştirme miktarları hesaplanır.

Max.B.Ş.D. = (Maksimum eksendeki uzunluk-orijinal daire çapı)x100
(4.10)

Min. B.Ş.D. = (Minimum eksendeki uzunluk-orijinal daire çapı)x100
(4.11)

Max.B.Ş.D. = Maksimum Birim Şekil Değiştirme

Min.B.Ş.D. = Maksimum Birim Şekil Değiştirme



Şekil 4.31. Şekillendirme sonrası oluşan elips formları ve dikkate alınması gereken eksenler [20]

Deney numunesinin boyutlarını değiştirerek, çekme, germe, şişirme deneyleri ile plastik şekil değiştirme işlemi için farklı gerilme durumları oluşturulur. Bu gerilme şartları altında malzemede boyun verme veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme işlemi sürdürülür. Deney sonrası değerlendirme için boyun verme bölgesindeki, çatlak bölgesindeki veya çatlağın bitişiğindeki komşu daireler seçilir. Ancak bu seçim başlangıçta kesin yapılır ve tüm analizler için hep aynı bölgedeki daireler değerlendirilir.

4.5. Şekillendirme Sınır Diyagramları'nda Kırılma Mekaniği

Levha şekillendirme işlemleri çift eksenli gerilme ($\beta=\varepsilon_1/\varepsilon_2=1/2$) olduğu ve çift eksenli gerilimde ($\beta=1$) olduğu durumlar arasında kalan bölgenin altında tanımlanır. Kırılma kriteri incelendiğinde, bu bölge iki alt bölgeye bölünerek incelenmesi durumunda fayda vardır. Bunlardan bir tanesi en küçük birim şekil değiştirmenin negatif olduğu $\beta < 0$ bölgesi ve diğer bütün bölgeler içerisinde en küçük birim şekil değiştirmenin pozitif olduğu $\beta>0$ bölgesidir [27].

4.5.1. Negatif En Küçük Birim Şekil Değiştirme Bölgesindeki Kırılma

En küçük birim şekil değiştirmenin negatif olduğu $\beta < 0$ bölgesinde, şekil değiştirme sınırı plastik kararsızla kontrol edilir. Plastik kararsızlığın iki şekli yayılma boyun verme ve bölgesel boyun verme olarak tanımlanır.

4.5.1.1. Yayılma (Difüzyon) kararsızlığı

Swift, sertleşmeye yol açan birim şekil değiştirmedeki artışın yumuşamaya aynı anda yol açan birim şekil değiştirme ile başarıldığı zaman deformasyonla kararsızlığın başladığını iddia etmiştir. Ana gerilmelerin bir fonksiyonu olan şekil değiştirme seviyesi maksimuma doğru harekete geçer [27].

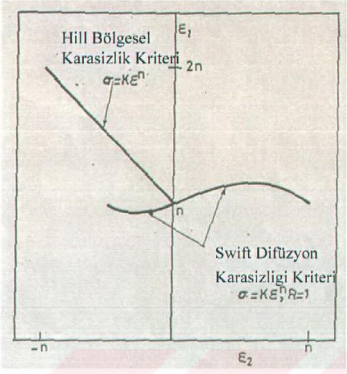
$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \quad \langle \quad \frac{\bar{\sigma}}{Zd} \tag{4.12}$$

$\bar{\sigma}$, gerçek gerilme; $\bar{\varepsilon}$ gerçek birim şekil değiştirme ve Zd uygulanan gerilme oranının
($\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$) bir fonksiyonu olan kritik teğettir. Bu yayılma boyun vermesinin başlangıcındaki gerçek birim şekil değiştirme aşağıdaki formülde verilmektedir.

$$\bar{\varepsilon} = nZd \tag{4.13}$$

Moore ve Wallace anizotrop malzemeler için yeni bir kriter geliştirmiştir. Hill anizotrop malzemeler için akma kriterini kullanarak sınır şekil değiştirmelerin ana ve kritik eğimi hesaplamıştır. Swift kriteri yayılma boyun vermesi meydana gelen tüm yüklemelerde kesin şekil değiştirme seviyelerini tespit etmek için kullanılabilir. Şekil 4.32 izotrop malzemeler için şekillendirme seviyelerini

göstermektedir. Her ne kadar şekillendirme işlemlerinde yayılma boyun vermesi genellikle bir sınır meydana getirmese de swift kriteri oldukça nadiren uygulanır.



Şekil 4.32. İzotrop malzemeler için şekillendirme kararsızlık seviyeleri [27]

4.5.1.2. Bölgesel kararsızlık

Hill bölgesel kararsızlık kriterini levha şekillendirmedeki gerçek sınır şekil değiştirmelerini vererek bölgesel kararsızlık kriterini ortaya koymayı amaçlamıştır. Kriter Swift'in kriteri ile benzerdir. Ancak Hill bölgesel kararsızlığı (örneğin; levhadaki bölgesel incelme) düzlemsel gerilmede meydana geldiğini kabul etmiştir. Daha büyük düzlemsel gerilmelerin sonucu olarak deformasyon sertleşmesi meydana geldiğinde bölgesel kararsızlığın arttığını göstermiştir. Düzlemsel gerilmede geometrik yumuşama miktarı ile ana gerilmeler (σ_1) tolere edilir.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{Z\square} \qquad (4.14)$$

$Z\square$, Zd ile aynı parametredir. Bölgesel kararsızlığın başlangıcındaki gerçek şekil değiştirme aşağıdaki formülde verilmektedir.

$$\bar{\varepsilon} = nZ\square \qquad (4.15)$$

Hill'in anizotropik akma kriterini baz alarak, Venter ve Malherbe r_0, r_{90} ve ρ'nın bir fonsiyonu olarak $Z\square$ 'yi hesaplamışlardır.

Bölgesel boyun verme uzamanın sıfır olduğu levha düzleminde bir yönde olması gerekir. Böylece, bu tip kararsızlık sadece $\varepsilon_2 \leq 0$ olduğunda meydana gelir. Şekil 4.25'de izotrop malzemelerdeki bölgesel kararsızlık kriteri gösterilmiştir.

4.5.2. Pozitif En Küçük Birim Şekil Değiştirme Bölgesindeki Kırılma

Swift'in yayılma kararsızlık kriteri iki eksenli germe işleminde uygulanabilir. Yayılma boyun vermesinin üzerindeki bir noktada, iki eksenli germe şekillendirme prosesi çok uygun deformasyon aralığını nadiren tanımlar. Hill bölgesel karasızlık kriteri ancak $\varepsilon_2 \geq 0$ ile sıfırdan artış çizgisi olmadığı için bu bölgede kendi orijinal şeklinde uygulanamaz.

4.5.2.1. Kararsızlığa dayalı kriter

İki eksenli germedeki sınır birim şekil değiştirmenin önceden tahmin edilme yaklaşımı 1967 yılında Marciniak ve Kuczynski tarafından verilmiştir. Bu yaklaşım, malzemedeki var olan eksikliklere yol açan bölgesel kararsızlığa dayalı yaklaşımdır. $\beta = 1$'den $\beta = 0$ meydana geldiği birim şekil değiştirme durumunda malzemede eksikliklerin olduğunu ve bu nedenle şekil alma için bu eksikliklerin bölgesel boyun vermeye izin verdiğini iddia etmişlerdir [27].

4.5.2.2. Sünek kırılmaya dayalı kriter

Embury ve arkadaşları şekil değiştirme işlemlerinde boyun verme ve kırılma arasında bir rekabeti içerdiğini iddia etmişlerdir. Özellikle yassı levhalardaki sınırlı süneklik özelliğinin çift eksenli germede kırılmanın şekillendirilebilirliği kontrol edilebileceğini düşünmüşlerdir. Sonuçta sünek kırılma kriteri yassı metal şekillendirmede uygun olabilir. Değişik kriterler metalin kırılma davranışını açıklamaya çalışmıştır. Örneğin; maksimum çekme gerilimi, maksimum kesme gerilimi, maksimum hacimsel birim şekil değiştirme verilebilir. Fakat bütün bunlar özellikle sünek malzemeler için sınırlı seviyelerdedir. Birim şekil değiştirme-yayılma teorisini bulan Kaftanoğlu hidrolik şişirme ve gererek şekil verme de kırılmanın önceden tahmin edilebileceğini belirtmiştir. Ancak bu teori büyük bilgisayar programı ve çok fazla numerik analiz istediğinden dolayı uygulanması güçtür.

McClintock şekillendirme proseslerinde kırılma deformasyonlarının önceden tahmin edilebilmesi yaklaşımlarını ortaya koymuştur. Bu yaklaşıma göre inklüzyon şekli, boyutu, aralığı, mikro boşluk büyüme hızı ve malzeme

deformasyon sertleşmesi seviyesi bilgileri gereklidir. Mc Clintock kırılmanın mikro boşluklar ve bunların oluşması için plastik işlemle bağlantılı olarak homojen deformasyondan daha küçük şekil değiştirmelerde kırılmanın bölgesel kayma ile meydana geldiğini belirtmiştir.

Ghosh McClintock yaklaşımını yassı şekillendirmeye uygulamıştır. Bu çalışmaya göre eğer bir sınır birim şekil değiştirme bir deformasyon bölgesinde ölçülebildiyse (çekme testi) bu birim şekil değiştirme malzemenin inklüzyonlarından kaynaklandığı bilgisini verir. Böylece diğer deformasyon bölgeleri için kırılma birim şekil değiştirmesi (çift eksenli germe) hesaplanabilir. Bu yaklaşıma göre kırılma aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$(1+\alpha)\sigma_1^{\,2}=K_{cr} \qquad (4.16)$$

K_{cr} bir malzeme sabiti olup kayma bağlantılarının kritik olma olasılığı ile ilintilidir ve çekme testi ile tanımlanır. Cockcroft ve Latham sünek kırılma kriterinin gerilme ve birim şekil değiştirme bileşimi esasına göre ele almıştır. Büyük ilk çekme gerilmeleriyle oluşan plastik deformasyon sonucu kırılmanın meydana geleceğini tahmin etmişlerdir. En büyük çekme gerilmesi σ_1 kritik gerilme değerini ,C, işaret eder. C çekme testi ile hesaplanabilen kırılma enerjini göstermektedir.

$$\int_0^{\varepsilon f} \sigma_1 . d\bar{\varepsilon} = C \qquad (4.17)$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, alüminyum sürekli döküm tekniği ile üretim yapan Fata-Hunter Speed Caster lisanslı döküm makinalarında 5 mm kalınlığında dökülmüş 5052 ve 5182 alaşımlı malzemeler kullanılmıştır. Söz konusu malzemelerin kimyasal kompozisyonunu belirlemek için ARL3460 marka spektrometrede yapılan testlerde elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları

Alaşım		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5052	Standart	0,25	0,4	0,1	0,1	2,8	0,15 - 0,35	0,1	-	-
	Numune	0,151	0,323	0,038	0,065	2,561	0,177	0,051	0,02	96,59

Alaşım		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5182	Standart	0,2	0,35	0,15	0,20 - 0,50	4,0 - 5,0	0,1	0,25	0,1	-
	Numune	0,207	0,344	0,052	0,361	4,426	0,156	0,053	0,019	94,35

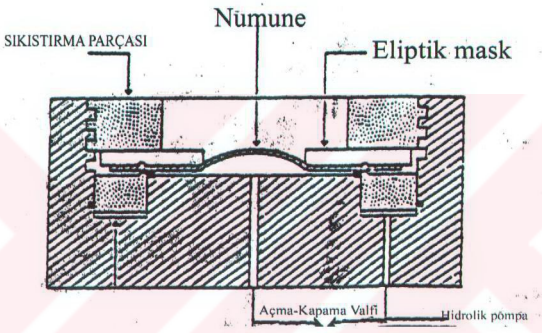
5.2. Kullanılan Cihazlar

Malzemeleri haddelemek için Achenbach soğuk hadde makinası ve tavlamak amacıyla endüstriyel ısıl işlem fırınları kullanılmıştır. Döküm numuneleri metalografik numune hazırlama ekipmanları ile hazırlanmış ve bakalite alınan numuneler koloidal silika ile parlatılmıştır. Makro inceleme numuneleri Barkers çözeltisi ile dağlanmış, Olympus SZ-ET Stereo mikroskobu ile incelenmiştir. Mikro incelemeler ise % 0,5 HF çözeltisiyle dağlanmış ve Olympus PME3 ışık mikroskobu ile incelenmiştir. Mekanik özellik değerlerini belirlemek için ASTM E 646 standartlarına göre hazırlanan numuneler Zwick Z050 çekme cihazında test edilmiştir. Çekme testi cihazında çekme hızı 10 mm/dak olacak şekilde numuneler çekilmiştir. Erichsen testi için manuel işleyen bilya çapı 10 mm olan Erichsen test cihazı kullanılmıştır. Hidrolik şişirme testleri özel olarak hazırlanan test düzeneğinde yapılmıştır. Yüzeyde ağ yapısını oluşturmak için elektrokimyasal grid dağlama cihazı ve deney sonrası dairelerin boyutlarını ölçmek için Mitutoyo marka portatif skalalı büyütme cihazı kullanılmıştır. Deneyde hidrolik şişirme

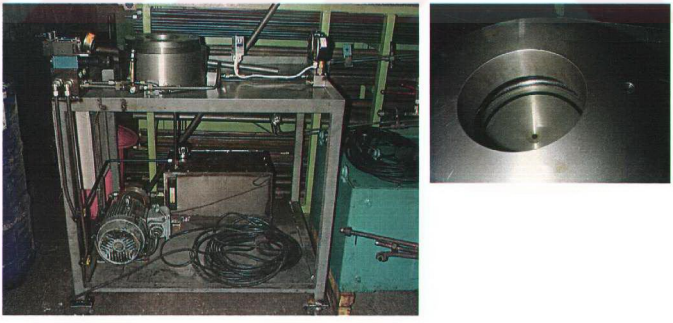
sonucu çatlayan numuneler ve çekme test sonucunda elde edilen kırık yüzeyleri JEOL JSL 5600LV marka taramalı elektron mikroskobunda incelenmiş ve inklüzyon analizleri EDS'de yapılmıştır.

5.2.1. Hidrolik Şişirme Test Düzeneği

Şekillendirme sınır diyagramlarının sağ tarafının belirlenmesi için hidrolik şişirme test düzeneği Assan Alüminyum firmasında Şekil 5.1'deki şematik düzen esas alınarak hazırlanmıştır. Kurulan hidrolik şişirme düzeneği Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

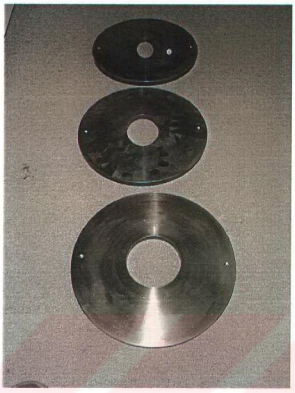


Şekil 5.1. Hidrostatik şişirme kalıbı düzeneği [29]



Şekil 5.2. Hazırlanan hidrostatik şişirme test düzeneği ve yağlama yuvası

Hazırlanan düzenekte hidrolik yağ olarak Mobil 314 yağı ve 100 Bar'a kadar ayarlanabilir basınçlı valf kullanılmıştır. Çelikten yapılan kalıp geometrileri ise 50 : 100, 70 : 100 ve 100 : 100 eliptik ve dairesel formdadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Hidrostatik şişirme testinde kullanılan kalıp fotoğrafları

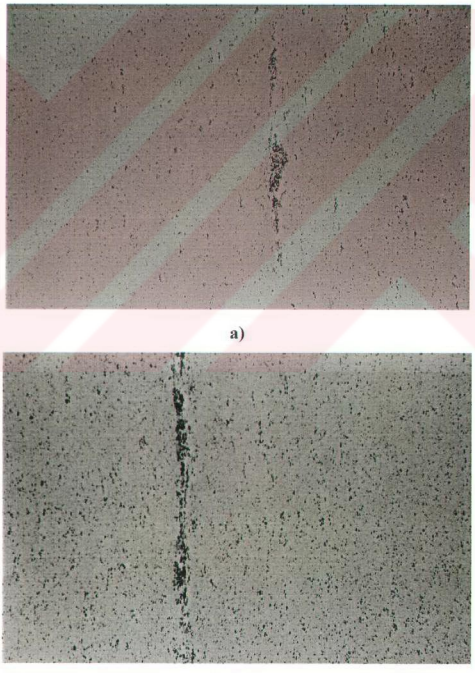
5.3. Deneylerin Yapılışı

Sürekli döküm yöntemiyle üretilmiş 5052-5182 alaşımlarından alınan numunelerin spektral analizi yapılarak kimyasal kompozisyonları belirlenmiştir (Tablo 5.1). Döküm yapılarını tespit etmek amacıyla, soğuk bakalite alınarak metalografik hazırlama sonrasında optik ve stereo mikroskopta döküm mikroyapıları incelenmiştir. 5 mm kalınlığındaki malzemeler endüstriyel koşullarda 1 mm'ye haddelenerek nihai olarak tavlanmıştır. Uygulanan proses sonrası 0, 45, 90 ^{0} açılı çekme numuneleri hazırlanarak $\sigma_ç$, σ_a, % e, n, R, ΔR ve $\overline{R}$ değerleri bulunmuştur. Erichsen test düzeneği yardımıyla derin çekilebilirliğin bir ölçüsü olan Erichsen değerleri tespit edilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramlarının sol tarafı için değişik ebatlarda çekme numuneleri ve diyagramın sağ tarafı için hidrolik şişirme testi numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin yüzeyi elektrokimyasal dağlama yöntemiyle birbirini kesen dairesel ağ yapıları ile kaplanmıştır (Şekil 4.28f). Yapılan testlerin sonucunda portatif skalalı büyütme cihazı ile ağ yapısını oluşturan daire boyutlarını tespit etmek suretiyle, maksimum ve minimum birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Elde edilen veriler Excel ortamında grafiğe dökülerek 5052 ve 5182 ŞSD çizilmiştir. 5052 ve 5182 alaşımlı

numunelerin çatlama sonrası kırık yüzeyleri SEM'de incelenmiş ve EDS yardımıyla çizgisel ve bölgesel element analizi yapılmıştır.

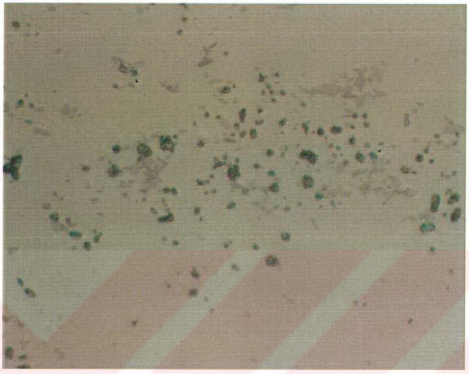
5.3.1. Metalografik İnceleme

Makroyapı karakterizasyonu amacıyla, 5 mm kalınlığında dökülmüş dökme rulolardan alınan numuneler döküm yönüne paralel yönlerde soğuk bakalite alınmıştır. Mekanik zımparalama işlemi sonrasında numuneler koloidal silika ile parlatılarak Barkers çözeltisinde dağlanmıştır. Dağlanmış numunelerin döküm yapıları mikroskopta incelenmiştir. İlk olarak mekanik parlatma yapılmış döküm yapıları makro olarak incelenmiştir. 10X büyütmelerde çekilen Şekil 5.4'deki yapılar incelendiğinde merkez hattı segregasyonun her iki alaşımda da var olduğu tespit edilmiştir.

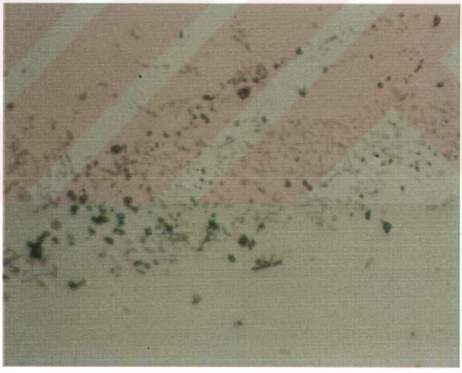


Şekil 5.4. Döküm yönüne paralel hazırlanmış döküm numunelerin makro fotoğrafları (10X); a) 5052, b) 5182

Şekil 5.4a'da görülen 5052 alaşımının MHS'u daha iğnemsi yapıda olup, 5182 alaşımının MHS'u daha kaba ve kolonsaldır. Aynı numunelerin dağlama sonrası daha büyük büyütmelerde çekilen makroyapı görüntüleri Şekil 5.5'de görülmektedir. Bu görüntülerde intermetalik partiküllerin oluşturduğu dendritik yapılar daha rahat gözlenebilmektedir.



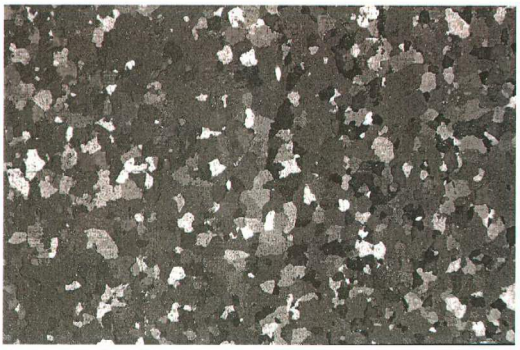
a)



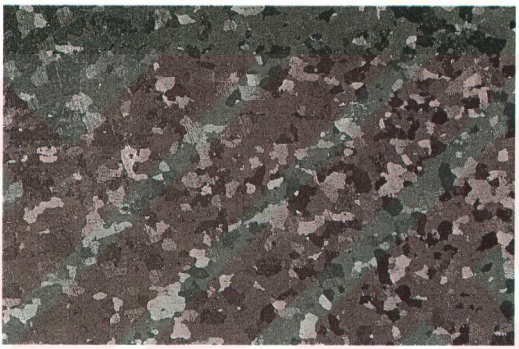
b)

Şekil 5.5. Döküm yapısının MHS kesit görünümü (500X) ; a) 5052, b) 5182

Mekanik parlatma sonrası yüzeylerin dağlanması sonucu Şekil 5.6'da görülen mikroyapılar ortaya çıkmıştır. 5052 ve 5182 alaşımlarının tane yapısı birbirine yakın olsa da, iki yapıda da yarı-homojen bir tane dağılımı söz konusudur.



a)



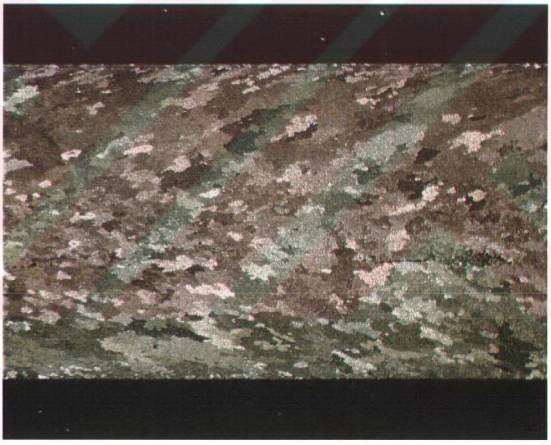
b)

Şekil 5.6. Döküm numunelerinin tane yapısı (100X); a) 5052, b) 5182

İncelenen alaşımlarda homojenleştirme ısıl işleinin mikroyapıya etkisini belirlemek için döküm kalınlığındaki malzemeler 450 ^{0}C'de 8 sa tavlanmışlardır. Numune hazırlama ve dağlama işlemlerinden sonra Şekil 5.7'deki mikroyapılar elde edilmiştir.



a)



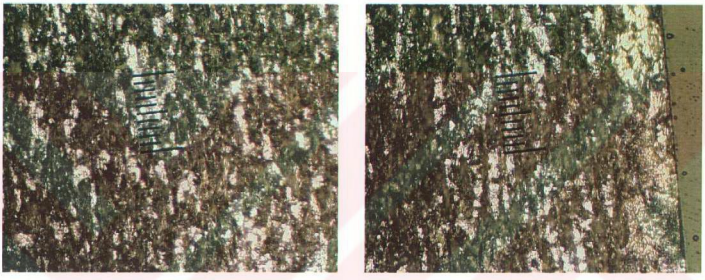
b)

Şekil 5.7. Döküm yapısının 450 ^{0}C/ 8 saat homojenleştirme tavlaması sonucu elde edilen tane yapısı (10X); a) 5052, b) 5182

Her iki alaşımın tane yapısı ve dağılımda çok ciddi farklar olmamasına rağmen bu sıcaklıklarda tanelerin kabalaştığı görülmektedir. İki yapının da kritik özelliği, dış yüzeylerdeki tanelerin daha ince olması ve merkeze doğru kaba tanelerin artmasıdır. Ancak 5052 alaşımında dıştaki ince tanelerin yoğunluğu 5182 alaşımına göre daha fazladır. Bu görüntüler yeniden kristalleşmenin dış yüzeyden başlayarak içeriye doğru geliştiğini göstermektedir. Yapının kesit boyunca

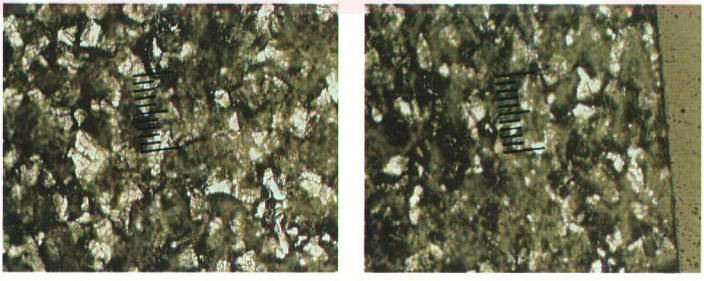
değişmesinin sebebi, proses gereği iç ve dış yüzeyde oluşan soğuma farklılıklarındandır. Bu sebeple; nihai kalınlıkta tavlanacak olan bu alaşımların ısıl işlem koşullarının belirlenmesinde daha önceden bu alaşımlara yapılan yeniden kristalleşme sıcaklığı belirleme deneylerinden faydalanılmış ve davranışları incelenerek nihai malzeme 5052 alaşımı için 350 ^{0}C'de 4 saat, 5182 alaşımı için 410 ^{0}C'de 4 saat endüstriyel fırınlarda tavlanmasına karar verilmiştir [29].

Her iki alaşımda 1 mm kalınlığa haddelenip ilgili sıcaklılarda tavlandıktan sonraki mikroyapıları Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



a) b)

Şekil 5.8. 1 mm kalınlığında 5052 alaşımının 350 / 4 sa tavlanması sonucu elde edilen tane yapısı (100X); a) Merkez, b) Kenar



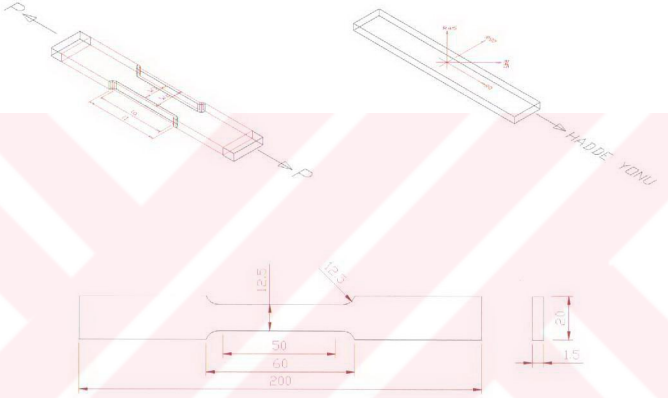
a) b)

Şekil 5.9. 1 mm kalınlığında 5182 alaşımının 410 / 4 sa tavlanması sonucu elde edilen tane yapısı (100X); a) Merkez, b) Kenar

5052 alaşımlı numunede orta bölgelerde 10-30 μm boyutunda taneler mevcut iken kenarlarda 200 μm boyutlarında tanelere rastlanmıştır. 5182 alaşımlı numunede kenar ve ortada homojen dağılmış 30-50 μm boyutlarında tanelere rastlanmıştır.

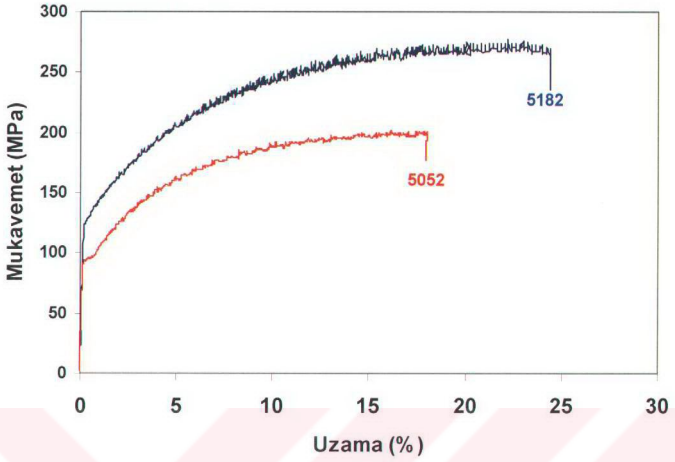
5.3.2. Mekanik Özelliklerin Tesbiti

Mekanik Özelliklerin tesbiti amacıyla 0, 45, 90 yönlerinde çekme numuneleri hazırlanarak çekme testine tabi tutulmuştur. Levha üzerinden numunelerin alındığı bölgeler Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10. Değişik yönlerde hazırlanan çekme testi numunesi

Yapılan çekme deneylerinde her iki alaşımda da plastik deformasyon sırasında dinamik deformasyon yaşlanmasını belirten zig-zaglı çekme eğrisi elde edilmiştir. Bu olay, Portevin-LeChatelier etkisi olarak bilinen, çökelti atomlarıyla dislokasyonların etkileşiminden kaynaklanan deformasyon yaşlanması nedeniyle meydana gelmektedir. Ayrıca, çekme numuneleri yüzeyinde çapraz kayma bandı izleri diğer adıyla Lüders bantları gözlemlenmiştir. 5052 ve 5182 alaşımlı malzemelerin çekme deneyi ile elde edilen (mukavemet-%uzama) eğrileri Şekil 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.11. 5052-5182 Kalite alüminyum alaşımlarının (Mukavemet-%Uzama) Eğrileri

1 mm kalınlıklı nihai tavlı malzemelerden $0,45,90^0$ yönlerinde hazırlanmış numunelere yapılan çekme testi sonuçları aşağıdaki Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.2. 5052 alüminyum alaşımının (350°C/4saat tav) sonucu çeşitli yönlerde (0-45-90°) yapılan çekme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikler

Kondüsyon / Numune Yönü	Kalınlık (mm)	σa (MPa)	σç (MPa)	% Uzama	n	R
350°C/4sa tavlı/0°	1,040	91,57	198,33	20,54	0,27	0,68
		90,22	196,83	23,07	0,27	0,60
	1,035	90,97	197,85	17,67	0,27	0,61
		92,51	200,47	17,77	0,27	0,59
350°C/4sa tavlı/45°	1,035	86,12	190,53	22,45	0,27	0,68
		87,74	192,73	24,14	0,27	0,67
		86,28	191,78	23,53	0,27	0,59
		86,62	190,10	21,42	0,27	0,65
350°C/4sa / 90°	1,045	87,55	187,50	22,16	0,27	0,60
		87,12	187,23	21,17	0,27	0,58
	1,050	88,65	188,76	22,35	0,27	0,59
		88,75	189,17	21,18	0,27	0,54

Tablo 5.3. 5182 alüminyum alaşımının (410°C/4saat tav) sonucu çeşitli yönlerde (0-45-90°) yapılan çekme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikler

Kondüsyon / Numune Yönü	Kalınlık (mm)	σa (MPa)	σç (MPa)	% Uzama	n	R
410°C/4sa tavlı/0°	1,030	165,02	295,25	22,55	0,26	0,60
	1,030	162,22	292,66	21,08	0,26	0,61
	1,035	160,80	294,83	22,56	0,27	0,60
	1,040	160,21	292,17	23,31	0,26	0,59
410°C/4sa tavlı/45°	1,040	155,88	286,51	25,29	0,27	1,08
	1,040	155,05	287,59	24,58	0,27	1,12
	1,040	154,08	288,90	23,85	0,28	1,16
	1,045	153,79	286,17	24,49	0,27	1,22
	1,040	160,36	288,17	21,38	0,26	0,93
	1,035	160,52	291,75	23,83	0,25	1,08
	1,040	160,82	291,83	24,18	0,26	0,98
410°C/4sa tavlı/90°	1,045	163,66	294,12	19,97	0,26	0,73
	1,045	159,65	289,92	21,66	0,26	0,66
	1,040	160,86	292,46	22,23	0,26	0,73
	1,045	160,53	291,10	18,67	0,27	0,80

Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de görüldüğü gibi, malzeme yapısındaki magnezyum miktarı arttıkça akma ve çekme mukavemeti artmaktadır. Yani; 5182 (Ağırlıkça %4.4 Mg) alüminyum alaşımları 5052 (Ağırlıkça % 2,6 Mg) alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Süneklik açısından incelendiğinde, iki alaşımın süneklikleri (% uzama) arasında belirgin bir fark tespit edilememiştir.

Hadde yönünde, hadde yönüne dik doğrultuda ve hadde yönü ile 45^0 doğrultudaki deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerlerini farklılıklar göstermesi nedeni ile n değerlerinin ortalaması aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır.

$$n = \frac{n_0 + n_{90} + 2n_{45}}{4} \qquad (5.1)$$

Burada;

n_0 : Hadde yönündeki deformasyon sertleşmesi üssü;

n_{45} : Hadde yönü ile 45^0 açık yapan doğrultudaki deformasyon sertleşmesi üssü;

n_{90} : Hadde yönüne dik 90^0 açı yapan doğrultudaki deformasyon sertleşmesi üssü

Yapılan deneylerde elde edilen deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerleri, 5-18 % uzama arasında Zwick Z050 tarafından otomatik olarak hesaplanarak elde edilen değerlerdir Fata-Hunter Speed Caster lisanslı döküm makinalarında 5 mm

kalınlığında dökülerek 1 mm kalınlığa haddelenmiş ve H0 kondüsyonuna getirilmiş 5052 ve 5182 alaşımlı malzemelerin deformasyon sertleşmesi üssü değerlerinin ortalaması alındığında, Tablo 5.2'ye göre 5052 alaşımlı malzemenin n değeri 0,27, Tablo 5.3'e göre 5182 alaşımlı malzemenin n değeri 0,26 olarak hesaplanmıştır. Her iki alaşımın ortalama n değerleri arasında çok az bir fark görülmektedir. Az bir fark olmasına rağmen 5052 alaşımlı malzemenin n değerinin daha büyük olması, bu alaşımın 5182 alaşımlı malzemeye göre uniform şekillenebilirliğinin biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Derin çekme işlemlerinde kullanılan anizotropi katsayısı (R), malzemenin kalınlığındaki deformasyonun genişlikteki deformasyondan az veya çok olduğunu belirtir ve $\overline{R}$ ortalama dikey anizotropi katsayısı olarak isimlendirilir. İzotropik bir malzemede $\overline{R}=1$' dir. Yassı malzemeden numunenin alındığı yöne göre dikey anizotropi katsayısının değeri değişebilir. Bu nedenle yassı malzeme yüzeyinde farklı yönlerde ölçülen R değerlerinin ortalamasını almak gerekir. Dikey anizotropi katsayısının ortalaması;

$$\overline{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \tag{5.2}$$

şeklinde tanımlanır.

R_0 : Hadde yönündeki anizotropi katsayısı,

R_{45} : Hadde yönü ile 45^0 açık yapan doğrultudaki anizotropi katsayısı,

R_{90} : Hadde yönüne dik 90^0 açı yapan doğrultudaki anizotropi katsayısıdır.

$\overline{R}$ değerinin derin çekme derinliği ile orantılı olduğu literatürde belirtilmektedir [16,23]. Sacın düzlemindeki R değerlerindeki değişme, düzlemsel anizotropinin bir ölçüsü olarak ifade edilmektedir. Bu değişmeyi veren düzlemsel anizotropi katsayısı (ΔR);

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \tag{5.3}$$

bağıntısı ile verilir. İzotropik bir malzemede $\Delta R=0$ ve $\overline{R}=1$'dir. Denklem 5.3'den hesaplanan düzlemsel anizotropi katsayısı $\Delta R \neq 0$ ise, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere şekillendirilen üründe kulaklanma olur.

Denklem 5.2 ve Denklem 5.3'den faydalanılarak, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de belirtilen verilerle ortalama dikey anizotropi katsayıları ve düzlemsel anizotropi katsayıları hesaplanmıştır. Klasik döküm yöntemi (DC) ile üretilmiş 1 mm kalınlığındaki 5182 ve 5754 kalite alüminyum alaşımlarının literatür sonuçları [30], bu çalışmada incelenen alaşımlarının sonuçları ile birlikte Tablo 5.4'de karşılaştırma amacı ile verilmiştir.

Tablo 5.4. 5052-5182 alüminyum alaşımlarının çeşitli yönlerde (0-45-90°) yapılan çekme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikleri ve anizotropi katsayıları ve 5182-5754 alaşımlarının deney sonuçlarının [30] karşılaştırılması

	% Mg	σ_a (MPa)	$\sigma_ç$ (MPa)	% Uzama (ort)	R_0 (ort)	R_{45} (ort)	R_{90} (ort)	$\overline{R}$	ΔR
5052	2,56	91,3	198,4	21,45	0,62	0,65	0,58	0,62	-0,05
5182	4,43	162,1	293,7	22,64	0,60	1,08	0,73	0,87	-0,42
5182-DC	4,12	130	280	25,5	0,53	0,84	0,54	0,69	-0,30
5754-DC	2,91	94	218,7	24,7	0,49	0,76	0,51	0,63	-0,26

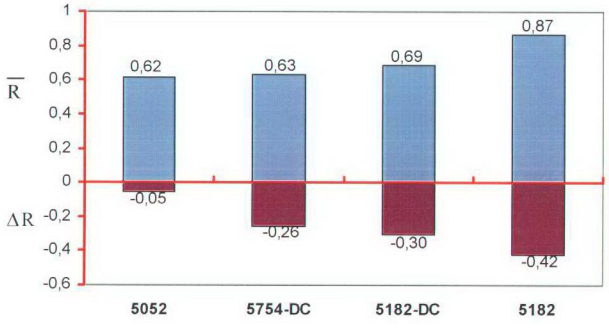
Ortalama dikey anizotropi katsayısı olarak bilinen $\overline{R}$ değerlerine bakıldığında, 5052 alaşımlı malzemede bu değer 0,62, 5182 alaşımlı malzemede ise 0,87'dir. İdeal izotrop bir malzemede $\overline{R}=1$ olduğu düşünüldüğünde, 5182 alaşımlı malzemenin $\overline{R}$ değeri 1'e daha yakın bir değerde olması sebebi ile 5052 alaşımlı malzemeye göre daha izotrop aynı zamanda daha iyi derin çekilebilir bir malzemedir diyebiliriz.

Deneyde kullanılan 5052 ve 5182 alaşımlarının düzlemsel anizotropi değerleri (ΔR) karşılaştırıldığında, 5182 alaşımlı malzemenin ΔR değerinin -0,42 olması bu malzemenin derin çekme sırasında 45^0'lik açı yapan yönde kulaklanması anlamına gelmektedir. ΔR değeri 0'a yakın olan malzemelerde kulaklanma daha az görüleceğinden 5052 alaşımlı malzemenin ΔR değeri -0,05 olması sebebiyle derin çekme esnasında hemen hemen hiç kulaklanma olmayacağını göstermektedir. Yani 5052 alaşımlı malzeme 5182 alaşımlı malzemeye göre daha homojen olarak plastik deformasyona uğrar.

Literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında [5,30], Mg (% Ağırlıkça) miktarı arttıkça, mukavemet değerlerinin, ortalama dikey anizotropi değerinin ve düzlemsel anizotropi değerinin arttığı ve buna bağlı olarak kulaklanma davranışının arttığı görülmektedir.

İki farklı yöntemle, klasik döküm (DC) ve ikiz merdane tekniği (TRC) ile levha döküm yöntemleri ile dökülmüş olan 5182 alaşımları karşılaştırıldığında ise; TRC ile dökülmüş 5182 malzemesinin $\overline{R}$ değeri 0,87 ve klasik döküm yöntemi ile dökülmüş 5182-DC malzemesinin $\overline{R}$ değeri 0,69 olarak bulunmuştur. İdeal izotrop bir malzemede $\overline{R}=1$ olduğu düşünüldüğünde, ikiz merdane tekniği ile dökülmüş 5182 malzemesinin $\overline{R}$ değeri 1'e daha yakın bir değerde olması sebebi ile klasik döküm yöntemi ile dökülmüş 5182-DC malzemesine göre daha izotrop bir malzemedir. Düzlemsel anizotropi değerleri karşılaştırıldığında, -0,30 değerine sahip 5182-DC alaşımı daha az kulaklanma davranışı gösterecektir. Her iki malzemenin de ΔR değeri 0'dan küçük olması sebebiyle, derin çekme sırasında 45^0'lik açı yapan yönde kulaklanma davranışı göstereceklerdir.

Şekil 5.12'de deneyde kullanılan TRC tekniğiyle dökülmüş 5052-5182 ve DC tekniğiyle dökülmüş 1 mm H0 kondüsyonundaki 5754 ve 5182 alaşımlı malzemelerinin anizotropi katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir.Şekil 5.12'de görüldüğü gibi, alaşımların magnezyum miktarı arttıkça derin çekilebilirliği artmakta, ancak 45 ^{0} yönündeki kulaklanma da artmaktadır.



Şekil 5.12. 1 mm kalınlık H0 kondüsyonundaki ikiz merdane tekniği ile dökülmüş 5052-5182 alüminyum alaşımlarının ve klasik döküm yöntemi ile dökülmüş 5182-5754 DC alüminyum alaşımlarının anizotropi özelliklerinin karşılaştırması

5.3.3. Erichsen Derinliği Tesbiti

Erichsen testi, sac ve bantların derin çekilmesindeki şekil değiştirme kabiliyetini tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. 70 mm genişlikte ve 300 mm boyundaki numuneler, Assan Alüminyum'da bulunan Erichsen test cihazında test edilmiş ve bir numune üzerinde 3 deney yapılmıştır. Üç ölçümün ortalaması alınmış ve deney üç kez tekrarlanmıştır. Ölçme hassasiyeti 0,1 mm olan göstergeden çökertme derinliği yani Erichsen derinlikleri tespit edilmiştir

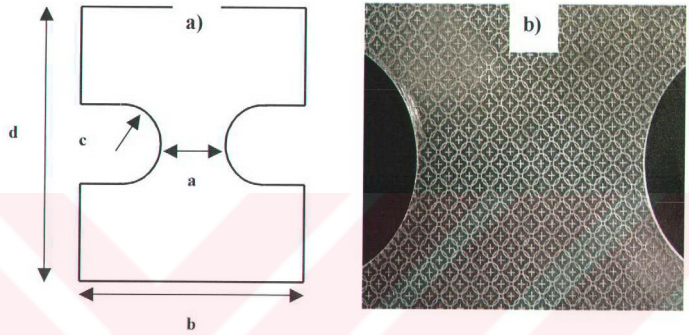
Tablo 5.5. 5052 ve 5182 alaşımlı malzemelerin Erichsen deneyleri sonuçları

ALAŞIM	Sıkıştırma Kuvveti (kN)	Bilya Çapı (mm)	Ortalama Erichsen Derinliği (mm)	Genel Ortalama Erichsen Derinliği (mm)
5052	10	10	9,4	≈ 9,5
			9,5	
			9,5	
5182	10	10	9,5	≈ 9,7
			9,7	
			9,8	

Erichsen test sonuçlarına göre; 5052-5182 alaşımlarının Erichsen değerleri 9,4 – 9,8 arasında değişkenlik göstermekte, aralarında büyük fark görülmemiştir. Ancak minimum ve maksimum değerler arasındaki 0,4 mm'lik fark göz önünde bulundurulduğunda, 5182 alaşımlı malzemenin daha iyi derin çekme özelliklerine sahip olduğu söylenebilir.

5.3.4. Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD) Sonuçları

ŞSD'nin sol tarafını oluşturabilmek için Tablo 5.6'daki ebatlarda hazırlanarak grid ağ yapısı oluşturulan çekme numuneleri Zwick Z050 marka bilgisayar destekli üniversal çekme cihazında, 10 mm/dak deney hızında çekme işlemine tabi tutulmuşlardır. Yüzeyin elektrokimyasal yöntemle dağlanan, birbirini kesen dairesel ağ yapılı çekme numunesi örneği Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.13. a) Çekme testi numune taslağı, **b)** Yüzeyi elektrodağlama ile birbirini kesen dairesel ağ dokusu yüzeyli çekme numunesi

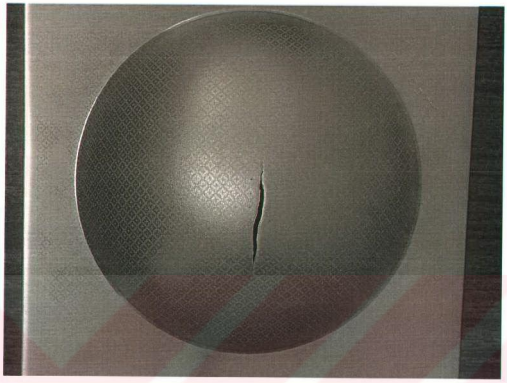
Tablo 5.6. Çentikli çekme testi numune ebatları

	a (mm)	**b** (mm)	**c** (mm)	**d** (mm)
Numune1	34	100	5	150
Numune2	34	100	10	150
Numune3	34	100	15	150
Numune4	34	100	30	150

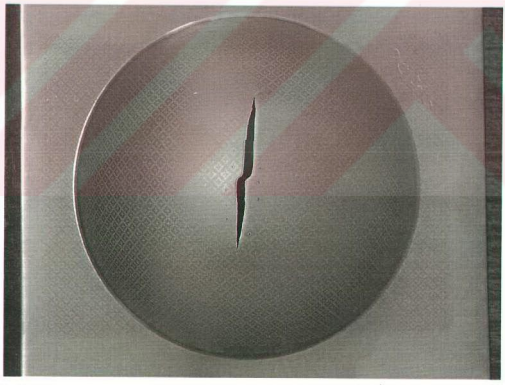
Çatlama bölgesindeki dairelerin deformasyon sonrası büyük ve küçük eksenlerinin portatif skalalı büyütme cihazı ile yapılan ölçümlerden elde edilen deney sonuçları EkA. TabloA1'de verilmiştir.

ŞSD'nin sağ tarafını oluşturabilmek için 300 x 300 mm ebatlarında kare kesitli numuneler hazırlanmış ve yine aynı elektrokimyasal dağlama metodu ile yüzeye birbirini kesen dairesel gridler yerleştirilmiştir.

Daha önceden bahsedilen 50 : 100, 70 : 100 ve 100 : 100 ebatlı geometrik şekillerden 50 : 100 mm geometrisi sürekli yırtılmalar meydana gelmesi sebebiyle yapılamamıştır. Şekil 5.14'de hidrolik şişirme testi sonucu oluşan 100 : 100 ebatlı geometrik şekilli numunelerde oluşan çatlama yüzey görüntüleri verilmektedir.



a)

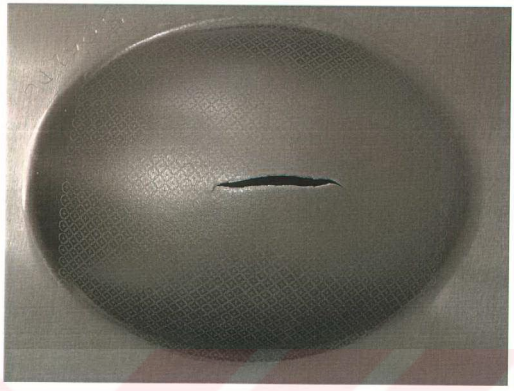


b)

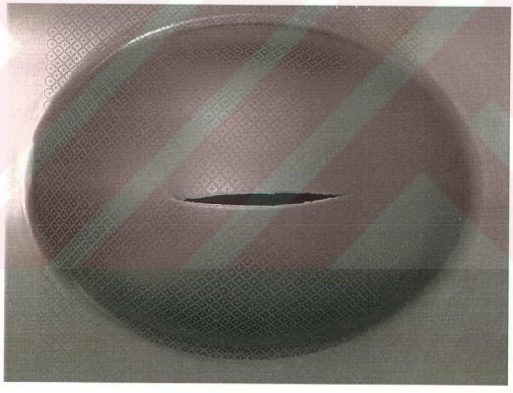
Şekil 5.14. Hidrolik şişirme test sonucu oluşan çatlama; kalıp 100 : 100 mm ; a) 5182, b)5052

Hidrolik şişirme test düzeneğinde metal yüzeyine uygulanan basınç sabit olup 100 Bar'dır. 5182 alaşımları genel olarak 80 Bar civarında, 5052 alaşımları ise 65 Bar civarında patlamıştır. Şekil 5.15'de hidrolik şişirme testi sonucu oluşan

70 : 100 ebatlı geometrik şekilli numunelerde oluşan çatlama yüzey görüntüleri verilmektedir.



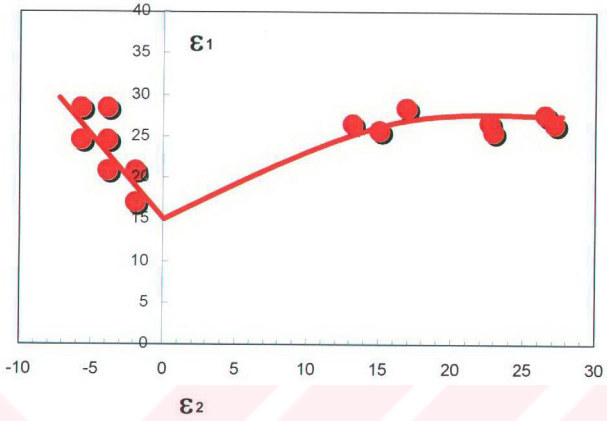
a)



b)

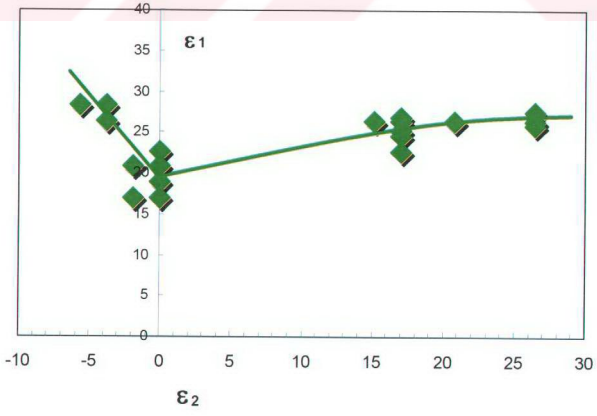
Şekil 5.15. Hidrolik şişirme test sonucu oluşan çatlama; kalıp 70 : 100 mm ; a) 5182, b)5052

Her iki kalıpta da, 5052 alaşımlı malzemelerde 5182 alaşımlı malzemelere göre hidrolik şişirme testi sonucu oluşan çatlamalar daha geniş ve büyük olarak gözlenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre elde edilen verilerle excel ortamında çizilen Şekillendirme Sınır Diyagramları'nda noktaların elle birleştirilmesi ile sınır eğrileri elde edilmiştir.



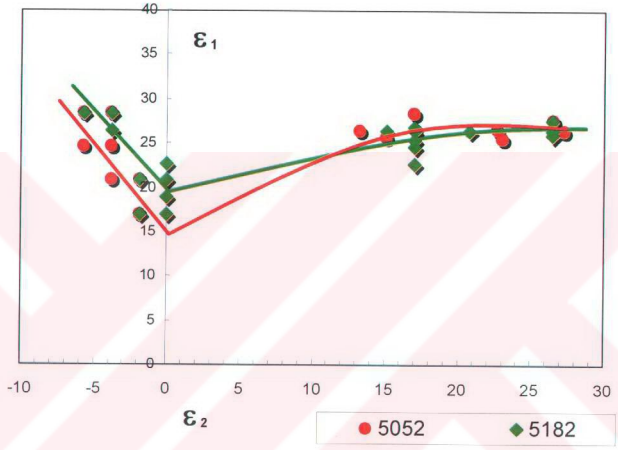
Şekil 5.16. 5052 Şekillendirme Sınır Diyagramı (Malzeme kalınlığı = 1 mm)

Şekil 5.16'de TRC yöntemi ile 5 mm kalınlığında dökülüp 1 mm kalınlığa haddelendikten sonra 350 ^{0}C / 4 saat tavlanan 5052 alaşımının Şekillendirme Sınır Diyagramı görülmektedir. Eğri maksimum birim şekil değiştirme eksenini 15 değerinde kesmektedir, bu nokta düzlemsel birim şekil değiştirme noktasıdır.



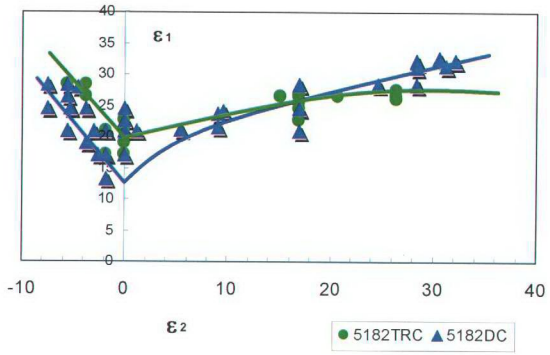
Şekil 5.17. 5182 Şekillendirme Sınır Diyagramı (Malzeme kalınlığı = 1 mm)

Şekil 5.17'de ise, TRC yöntemi ile 5 mm kalınlığında dökülüp 1 mm kalınlığa haddelendikten sonra 410 ^{0}C / 4 saat tavlanan 5182 alaşımının Şekillendirme Sınır Diyagramı görülmektedir. Eğri maksimum birim şekil değiştirme eksenini 20 değerinde kesmektedir. TRC ile dökülen 5052 ve 5182 alaşımlarının ŞSD'ları karşılaştırma amacı ile Şekil 5.16'da birlikte verilmiştir.



Şekil 5.18. TRC ile üretilen 5052 ve 5182 alüminyum alaşımlarının Şekillendirme Sınır Diyagramlarının karşılaştırılması (Malzeme kalınlığı = 1 mm)

Şekillendirme sınır diyagramında eğrinin altında kalan bölge şekillendirme işleminin güvenli olarak yapılabildiği ve üstünde kalan alan şekillendirme sınır diyagramının emniyetsiz olarak adlandırılan çatlamanın oluşacağı çalışma bölgesini ifade etmektedir. İki malzemenin şekillenebilme performansları karşılaştırıldığında, bu emniyetli bölgenin büyüklüğü ve birbirine göre kıyaslanması göz önünde bulundurulmaktadır. Şekil 5.18'de kırmızı renkli eğri 5052 alaşımının ŞSD'nı, yeşil renkli eğri ise 5182 alaşımının ŞSD'nı temsil etmektedir. Eğriler karşılaştırıldığında, kırmızı renkli eğri yeşil renkli eğriden daha aşağıdadır. Bu durum, 5182 alaşımlı malzemenin ŞSD'nın emniyetli bölgesini daha büyük ve yukarıda olduğunu göstermektedir. Deneyler sonucunda elde edilen iki eğriye göre, 5182 alaşımlı malzemenin şekillendirme performansının 5052 alaşımlı malzemeye göre daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

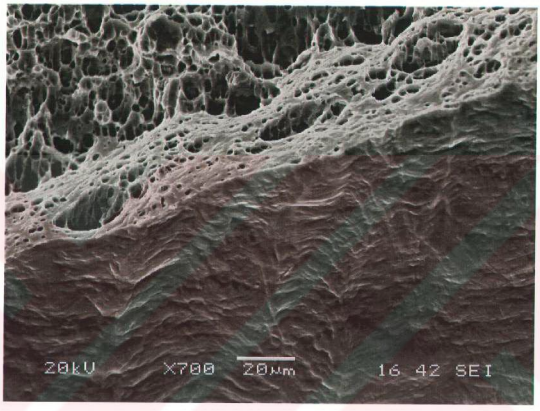


Şekil 5.19. 5182-TRC ve 5182-DC [30] ile üretilen alüminyum alaşımlarının Şekillendirme Sınır Diyagramları (Malzeme kalınlığı = 1 mm)

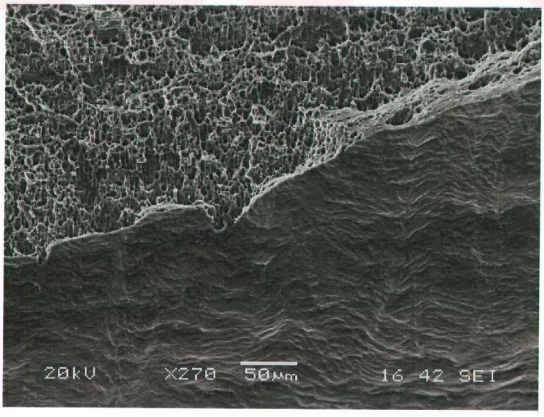
İki farklı yöntemle dökülmüş olan (TRC ve DC) 1 mm H0 kondüsyonundaki 5182 alaşımının karşılaştırmalı Şekillendirme Sınır Diyagramları Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Yeşil renkli eğri ikiz merdane tekniği ile dökülmüş 5182 alaşımlı malzemenin ŞSD'nı, mavi renkli eğri klasik döküm yöntemi ile dökülmüş 5182 alaşımının ŞSD'nı temsil etmektedir. ŞSD eğrileri karşılaştırıldığında, mavi renkli eğri yeşil renkli eğriden daha aşağıdadır. Buna göre; yeşil renkle temsil edilen ikiz merdane tekniği ile dökülmüş 5182 alaşımlı malzeme, klasik döküm yöntemi ile dökülmüş 5182 alaşımlı malzemeden daha iyi şekillendirilebilme performansı gösterecektir. ŞSD'larının kesiştiği şeklin sağ tarafında belirli bir noktadan sonra germe işlemlerinde 5182 DC alaşımlarının daha iyi şekillendirme özellikleri göstereceği söylenebilir. Ancak bu sonucun doğrulanması için farklı kalıp geometrilerinde hidrolik şişirme testi sayısını artırmak gerekir.

5.3.5. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi

Yapılan çekme deneyleri sonuçlarında elde edilen kırılma yüzeyleri SEM'de incelendiğinde 5052 ve 5182 alaşımlarında hemen hemen aynı kırılma karakteristikleri gözlenmiştir. Bütün incelemelerde, 5000 serisi alaşımlarının tipik intermetalik form yapıları ve sünek kırılmayı karakterize eden oyuklu kırılma yüzeyi gözlenmiştir. Şekil 5.20 ve 5.21'de 5052 alaşımlı malzemenin açılı kırılma yüzeyleri gösterilmektedir.

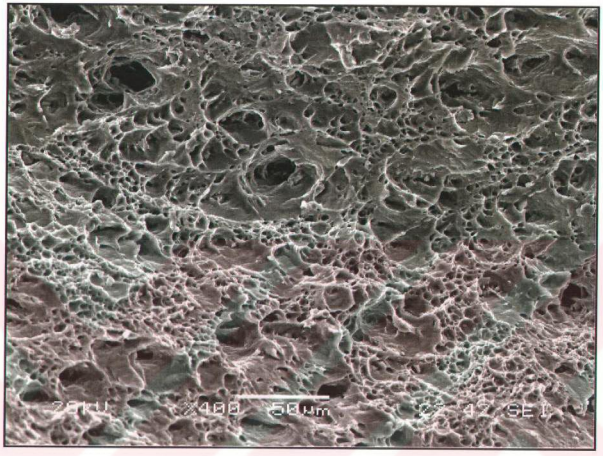


Şekil 5.20. 5052 alaşımının SEM ile çekilmiş açılı kırılma yüzeyi (700X)

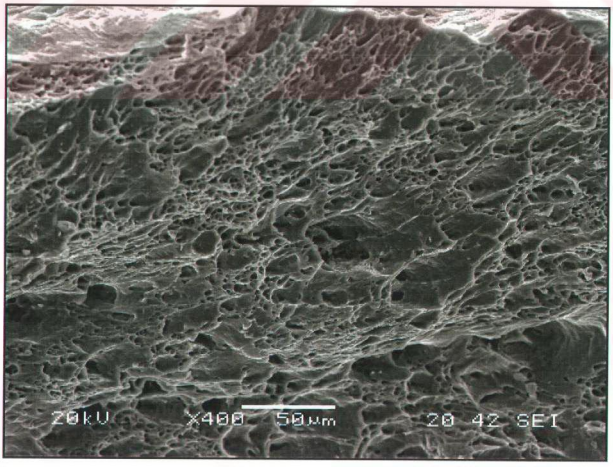


Şekil 5.21. 5052 alaşımının SEM ile çekilmiş açılı kırılma yüzeyi (270X)

Şekil 5.22'de 5182 alaşımlı malzemenin kırılma yüzeyinin hadde yönüne dik görüntüsü, Şekil 5.23'de yine aynı malzemenin kırılma yüzeyinin hadde yönüne paralel görüntüsü verilmektedir. Sünek kırılma yüzeylerini temsil eden süngerimsi yapı ve oyuklu kırılma yüzeyi Şekil 5.22 ve 5.23'de açıkça görülmektedir.

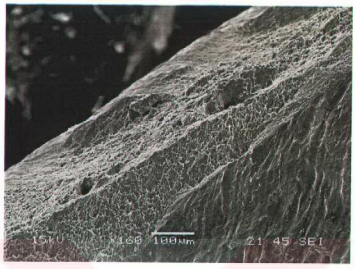


Şekil 5.22. 5182 alaşımlı malzemenin hadde yönüne dik kırılma yüzeyi (400X)

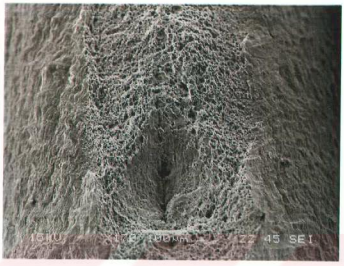


Şekil 5.23. 5182 alaşımlı malzemenin hadde yönüne paralel kırılma yüzeyi (400X)

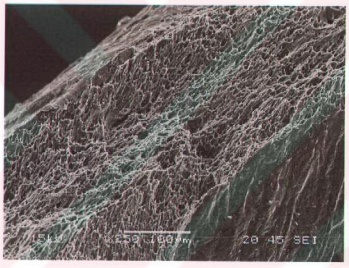
İnklüzyon araştırmaları için 5182 alaşımlı malzeme ele alınarak çekme testi yapılmış, kopmanın meydana geldiği bölgelerde kırılma yüzeyleri incelenerek, çizgisel elementel analiz ve elementel dağılım haritası çıkartılmıştır (Şekil 5.24-27). Yapılan incelemelerde Al-Fe-Si-Mg inklüzyonlarına rastlanmıştır.



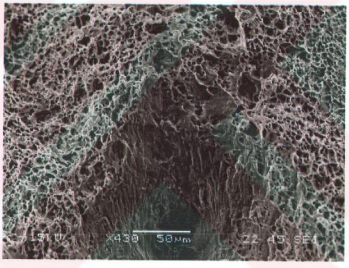
a)



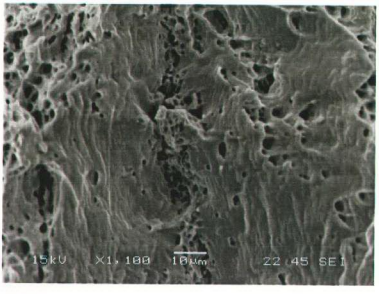
b)



c)

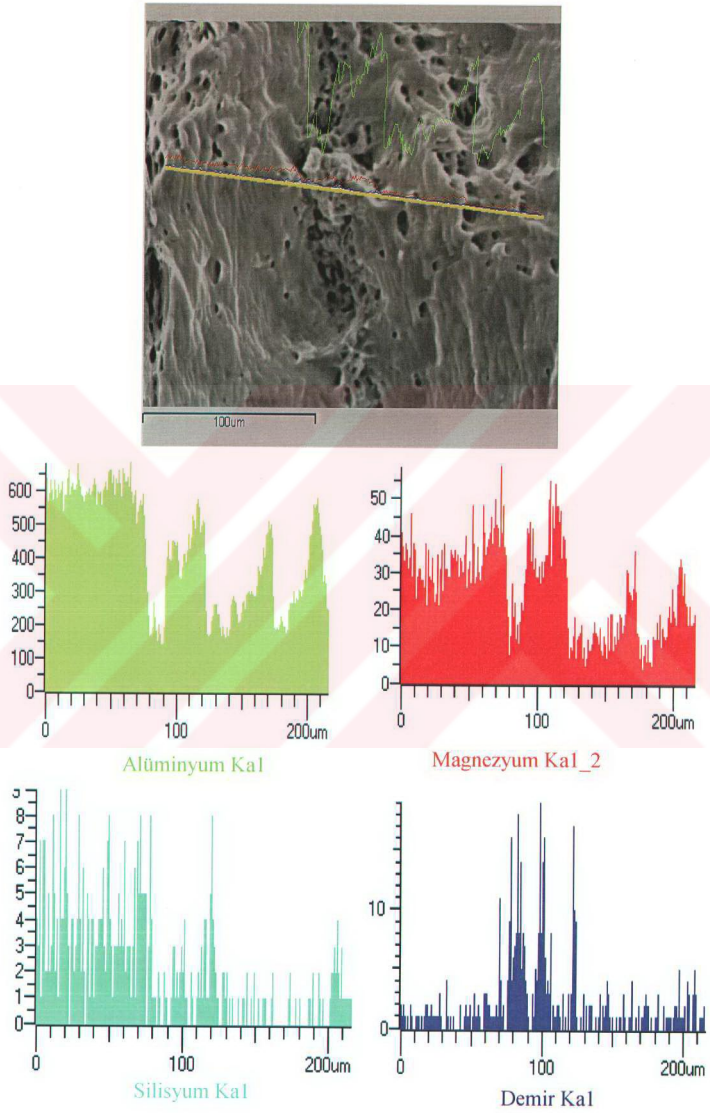


d)

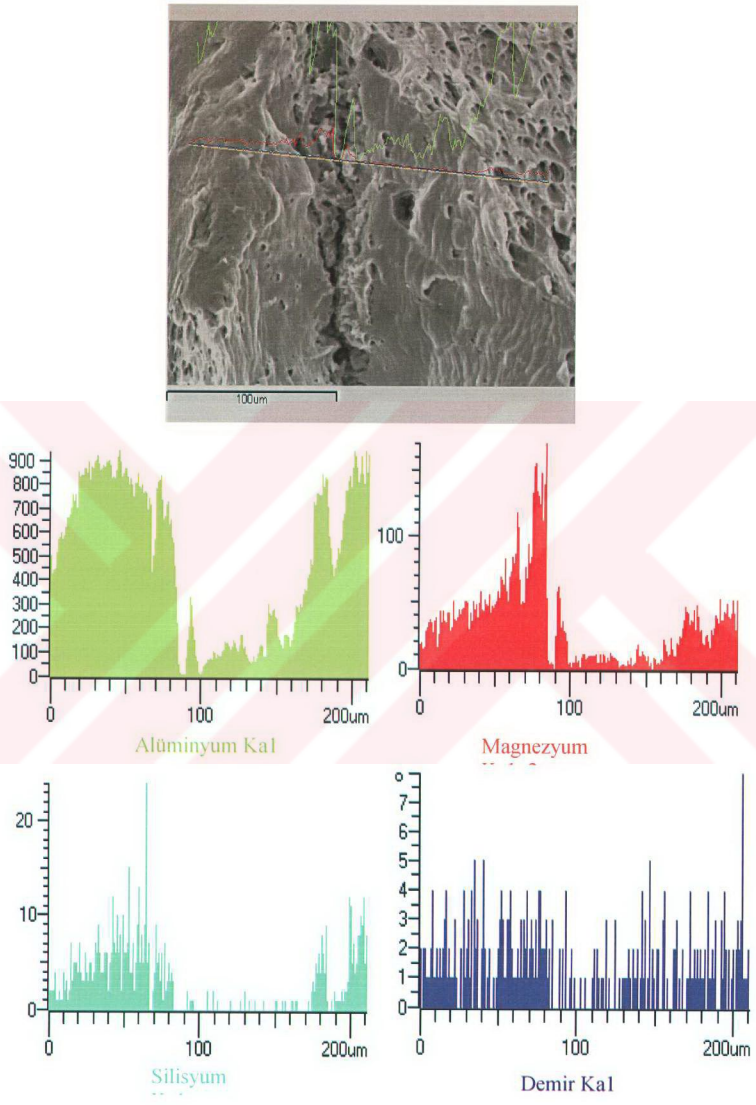


e)

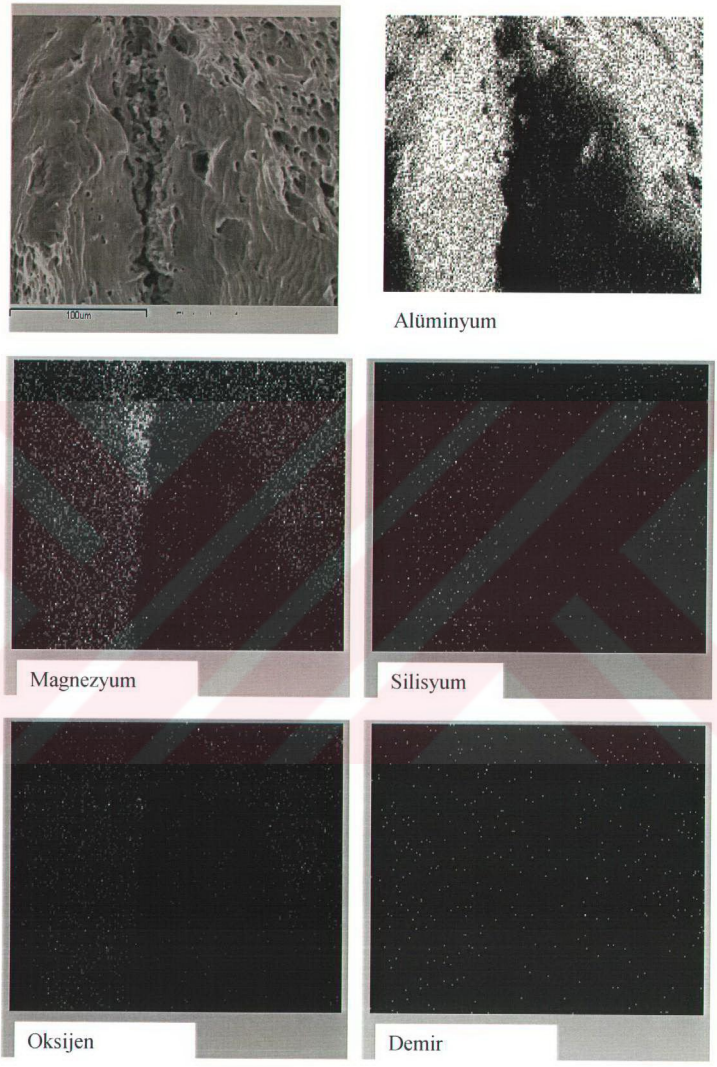
Şekil 5.24. 5182 alaşımlı malzemenin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, **a)** 160X, **b)** 170X , **c)** 250X, **d)** 430X, **e)** 1100X



Şekil 5.25. 5182 alaşımlı malzemenin kırılma yüzeyinde çizgisel element analizi-1



Şekil 5.26. 5182 alaşımlı malzemenin kırılma yüzeyinde çizgisel element analizi-2



Şekil 5.27. 5182 alaşımlı malzemenin kırılma yüzeyinde elementel dağılım haritası

6. GENEL SONUÇLAR

Alüminyum sürekli döküm teknolojisi ile üretilmiş 5052 ve 5182 standartlarındaki alüminyum alaşımlarının metalografik ve şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki genel sonuçlar tespit edilmiştir:

1. Malzeme yapısındaki magnezyum miktarı arttıkça akma ve çekme mukavemeti artmaktadır. Yani; 5182 (Ağırlıkça %4.4 Mg) alüminyum alaşımları 5052 (Ağırlıkça % 2,6 Mg) alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Süneklik açısından incelendiğinde, iki alaşım arasında çok büyük bir fark tespit edilememiştir.
2. Döküm yapıları incelendiğinde her iki alaşımda da merkez hattı segregasyonuna rastlanmaktadır. Ancak 5182 alaşımlarındaki merkez hattı segregasyonu, 5052 alaşımlarında görülen merkez hattı segregasyonundan çok daha yoğun ve geniş bir ağ yapısı içermektedir.
3. Döküm mikroyapılarına göre; yüzey bölgesinde yönlenme göstermeyen ince bir tane yapısı, hemen altında ise yönlenmiş ve uzamış tane yapısı yer almaktadır. Her iki alaşımında da döküm tane yapıları hemen hemen aynıdır.
4. Yapılan çekme deneylerinde her iki alaşımda da plastik deformasyon sırasında dinamik deformasyon yaşlanması görülmüştür.
5. Derin çekilebilirliğin bir ölçüsü olan Erichsen değerleri karşılaştırıldığında 5182 alaşımının ortalama Erichsen derinliği (9,7 mm), 5052 alaşımının Erichsen derinliğine (9,5 mm) göre daha yüksektir.
6. Üç yönlü (0^0,45^0, 90^0) olarak yapılan çekme testi sonuçlarından elde edilen $\overline{R}$ ve ΔR değerleri incelendiğinde; 5182 alaşımlı malzemenin 45^0 yönlerinde kulaklanma (ΔR=-0,42) davranışı göstereceği ancak şekillenebilirliğinin daha yüksek olduğu ($\overline{R}$=0,8), 5052 alaşımlı

malzemenin neredeyse hiç kulaklanma davranışı göstermeyeceği (ΔR=-0,05), ancak şekillenebilirliğinin 5182 alaşımına göre daha düşük olduğu ($\bar{R}$=0,62) tespit edilmiştir.

7. Deformasyon sertleşmesi üssü değerleri (n) incelendiğinde; n değerleri arasında çok az bir fark olduğu, 5052 alaşımının n değerinin 0,27, 5182 alaşımının ise 0,26 olduğu tespit edilmiştir.
8. Yapılan incelemelerde, her iki alaşımda da sünek kırılmayı karakterize eden oyuklu kırılma yüzeyleri gözlenmiştir. 5182 alaşımının kırılma yüzeylerinde yapılan çizgisel elementel analizlerde Al-Fe-Si-Mg inklüzyonlarına rastlanmıştır.
9. 5052 ve 5182 alaşımlı malzemelerin şekillenebilme performansları Şekillendirme Sınır Diyagramları ile belirlenmiştir. 5182 alaşımlı malzemenin ŞSD'ı, 5052 alaşımlı malzemenin ŞSD'ına göre daha yukarıda olması itibariyle 5182 alaşımının şekillenebilme kabiliyetinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Altmışoğlu, A.,** 1995. Alaşımlar Ders Notları, İ.T.Ü Kimya - Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Fakültesi, İstanbul.

[2] **Robert E. Sanders, Jr.,** February 2001, Technology Innovation in Aluminum Products, JOM, 21-25

[3] **Yun M., Lokyer S., Hunt J.D.,** 2000, Twin Roll Casting of Aluminum Alloys, Materials Science & Engineering A, Elsevier Science S.A., 116 -123

[4] **Okumuş, E.,** 2003. Sürekli levha döküm tekniğiyle üretilmiş 1XXX, 3XXX ve 5XXX alaşımlı levhaların mikroyapı karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] **Delikanlı, K.,** 1992. Soğuk Haddelenmiş Teknik alüminyumun derin çekilmesinde tavlama süresi ve sıcaklığının şekillendirme kabiliyetine etkileri, *Doktara Tezi,* Selçuk Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

[6] TALSAD Yayınları, 1995, Türkiye'de ve Dünya'da Alüminyum

[7] http://www.foresightproductions.com

[8] **Conserva M., Donzelli G., Trippodo R.,** 1992. Aluminum and Its Applications, Edimet, Brescia

[9] **Li B.Q.,** 1995, Producing Thin Strips By TRC, JOM

[10] **Romonovski C.A.,** Thin Gauge Roll Csting Method, *United States Patent,* No: 5,518,064, http://www.womplex.patents.ibm..com/

[11] **Kavaklıoğlu, B.,** 1999. Alüminyum Levha Üretiminde Proses Optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[12] http://www.foseco.com

[13] **Özden E.,** 1994, Assan Alüminyum Sürekli Döküm Eğitim Notları, İstanbul

[14] **Moser C.J.,** Continuous Casting Hunter Technology

[15] **Vangala P., Smith D., Duvvuri R., Romanowski C.A.,** 1992. The Influence of Casting Gauge on the Hunter Roll Casting Process, Melt Spinning and Strip Casting

[16] **Kayalı, E.S., Ensari, C.,** 1995, Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, İ.T.Ü Kimya - Metalurji Fakültesi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

[17] **Fakenstein, H.P.,** 1982, Formability of Aluminium Sheet Alloys (I), Aluminium, 670 – 675

[18] **Fakenstein, H.P.,** 1982, Formability of Aluminium Sheet Alloys (II), Aluminium, 701 – 709

[19] ASM Speciality Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, Fabrication and Finishing of Aluminum Alloys, ASM International, 231 – 246

[20] Sheet Metal Working Presentation, Internet Search Results

[21] **Okumuş, E.**, 2000. Saç Şekillendirme Hataları, Hasar Analizi Yüksek Lisans Ders Notları, İ.T.Ü Kimya - Metalurji Fakültesi, İstanbul.

[22] **Gibson, G.C., Smith, H.,** 1964. The principles of aluminium rolling, The British Aluminium Company Limited, Bainsford, Falkirk, Stirlingshire

[23] **Dieter G.E.,** 1981. Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill, Tokyo

[24] **Birol, Y., Dündar, M., Romanowski C.A.,** 2002. Twin-Roll Cast 5000 Series Aluminum Sheet For Automotive Applications

[25] **Çimenoğlu, H., Kayalı, E.s.,** 1984. alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirliğini Etkileyen Faktörler, II. Uluslararası Alüminyum Sanayii Kongresi, Seydişehir

[26] **Yazıcı, E.**, 1987. Alüminyumda tane boyutunun deformasyon davranışına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[27] Unknown, Forming Limit Diagrams and Failure Mechanism for Low and High Carbon Steels, Middle East Technical University

[28] **Manthey D.W.,** The Need for Surface Strain Measurement, Metal forming Magazine, Metalforming Online

[29] **Dündar M.,** 2001. 5000 Serisi Laboratuar Çalışmaları, Assan Alüminyum

[30] **Slamova M.**, 2002, Continuous casting technologies for production of aluminium alloy sheets for transportation applications, Research Report

[31] **Haberfield A.B., Boyles, M.W.,** 1973. Laboratory Determined Forming Limit Diagrams, Sheet Metal Industries, 400 – 405

[32] Lectroetch Metal Marking Systems, Originators of Electrochemical Marking, Catalog 696, http://www.lectroetch.com

EK.A.

Tablo A.1. 5052 ve 5182 alaşımlarının test sonuçlarına göre gridlerin ölçüm değerleri

5052		5182	
Maks. BŞD	Min. BŞD	Maks. BŞD	Min. BŞD
16,98113208	-1,886792453	16,98113208	0
20,75471698	-1,886792453	18,86792453	0
16,98113208	-1,886792453	16,98113208	-1,886792453
16,98113208	-1,886792453	16,98113208	0
24,52830189	-3,773584906	20,75471698	-1,886792453
20,75471698	-3,773584906	20,75471698	-1,886792453
24,52830189	-3,773584906	20,75471698	-1,886792453
28,30188679	-5,660377358	20,75471698	-1,886792453
28,30188679	-5,660377358	26,41509434	-3,773584906
28,30188679	-3,773584906	26,41509434	-3,773584906
28,30188679	-5,660377358	28,30188679	-3,773584906
24,52830189	-5,660377358	26,41509434	-3,773584906
28,30188679	-5,660377358	28,30188679	-5,660377358
28,30188679	-5,660377358	28,30188679	-5,660377358
28,30188679	-5,660377358	28,30188679	-5,660377358
28,30188679	-5,660377358	28,30188679	-5,660377358
22,64150943	22,64150943	24,52830189	26,41509434
24,52830189	24,52830189	26,41509434	26,41509434
22,64150943	22,64150943	26,41509434	26,41509434
22,64150943	22,64150943	26,41509434	26,41509434
23,11320755	23,11320755	27,54716981	26,41509434
28,30188679	16,98113208	25,28301887	16,98113208
28,30188679	16,98113208	26,79245283	16,98113208
28,30188679	16,98113208	26,41509434	16,98113208
28,30188679	13,20754717	24,52830189	16,98113208
28,30188679	15,09433962	26,41509434	15,09433962
28,30188679	16,98113208	24,52830189	16,98113208
		22,64150943	16,98113208
		26,41509434	16,98113208
		26,41509434	20,75471698
		26,41509434	16,98113208

ÖZGEÇMİŞ

15 Eylül 1975 yılında Karabük'de doğdu. İlk ve orta tahsili aynı ilde tamamladıktan sonra lise tahsilini İstanbul'da tamamladı. 1993 yılında İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bir yıl hazırlık devresinden sonra lisans eğitimime başladı. Lisans öğrenimini bitirdiği 1998 senesinde hem İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde hem de ASSAN Alüminyum'da çalışmaya başladı. 2002 yılında askere gidip geldikten sonra aynı firmada Levha Değerlendirme Yöneticisi olarak görev yapmaktadır.

YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ