

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AA5005 SACLARDA HADDELEME SONRASI
YENİDEN KRİSTALLENME KİNETİĞİNİN TERMAL
ANALİZLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Atae RAOUGUI

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kenan YILDIZ

Haziran 2021

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AA5005 SAÇLARDA HADDELEME SONRASI
YENİDEN KRİSTALLENME KİNETİĞİNİN TERMAL
ANALİZLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Atae RAOUGUI

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 22/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Atae RAOUGUI

22/06/2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle, tezin araştırılması-planlanması ve yazılma konusunda beni yönlendiren her türlü desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof.Dr. Kenan YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında hoşgörü ve anlayışla yardımlarını esirgemeyen Prof.Dr. Özkan ÖZDEMİR'e, Doç.Dr. Tuba YENER'e, Arş.Gör. Mustafa DURMAZ'a, ve Bartın Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında görevli Yük.Müh. Volkan Murat YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Ek olarak maddi ve manevi olarak beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem Khadija LACHHEB, babam Mohamed RAOUGUI, kardeşlerim Jaber; Amer RAOUGUI ve sevgili eşim Pelin RAOUGUI' ye teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLOLAR LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Alüminyum ve Alaşımları	3
2.1.1. Alüminyum özellikleri.....	3
2.1.2. Alüminyumun tarihçesi	5
2.1.3. Alüminyum avantajları ve dezavantajları.....	6
2.1.4. Alüminyum saflığı.....	7
2.1.5. Alüminyum alaşımları	8
2.1.5.1. Alüminyum alaşımların sınıflandırması.....	8
2.1.5.2. Dövme alüminyum alaşımları	9
2.1.5.3. Dökme alüminyum alaşımları	10
2.1.5.4. Alüminyum alaşımlarına elementlerin etkileri.....	12
2.2. Plastik Şekil Verme Yöntemleri	17
2.2.1. Haddeleme	18
2.2.2. Dövme	19

2.2.3. Ekstrüzyon	21
2.2.4. Çekme	23
2.2.5. Derin çekme	25
2.2.6. Gerdirerek eğme	27
2.3. Yeniden Kristallenme Süreci	28
2.3.1. Toparlanma	30
2.3.2. Yeniden kristallenme	31
2.3.3. Yeniden kristallenmeye etikeleyen faktörler	32
2.3.3.1. Başlangıç tane boyutunun etkisi	32
2.3.3.2. Safılık etkisi	33
2.3.3.3. Deformasyon etkisi	34
2.3.3.4. Yeniden kristallenme kanunları	35
2.3.4. Tane büyümesi	35
BÖLÜM 3.	
MALZEME VE YÖNTEM	38
3.1. Malzeme	38
3.2. Yöntem	39
3.2.1. Deformasyon miktarı	39
3.2.2. Kinetik analiz	39
3.3. Kullanılan Cihazlar	41
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	42
4.1. Metalografik Çalışmalar	42
4.2. Yeniden Kristallenme Kinetiği	43
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR	53
KANAKÇA	54
ÖZGEÇMİŞ	56

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alüminyum Birliği
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alümina
Cu	: Bakır
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
E _a	: Aktivasyon enerjisi
Fe	: Demir
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
ppm	: milyonda bir
R	: Gaz sabiti
Si	: Silisyum
T	: Sıcaklık
T _{def}	: Deformasyon sıcaklığı
T _{erg}	: Ergime sıcaklığı
T _p	: Pik sıcaklığı
T _{yk}	: Yeniden kristallenme sıcaklığı
Zn	: Çinko
β	: Isıtma hızı
ε	: Deformasyon miktarı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Alüminyum atomik dizilişi (Kristal yapısı)	5
Şekil 2.2. haddeleme işleminin şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.3. Dövme işleminin şematik gösterimi	20
Şekil 2.4. Açık kalıpta dövme işleminin adımların diziliş	21
Şekil 2.5. Ekstrüzyon prensibinin temsili.....	22
Şekil 2.6. Ölü metal bölge ile ekstrüzyon detayı	23
Şekil 2.7. Tüp çekme yöntemleri: (a) – plug üzerinde; (b) - mandrel üzerinde; (c) - hareketli mandrel üzerinde; d – dönen kalıp ile çekme; 1 - kalıp; 2 - tüp; Q - çizim çekme (Danchenko, 2007).....	24
Şekil 2.8. Ölü metal bölge ile ekstrüzyon detayı	26
Şekil 2.9. Kırpma girintisi kullanılarak çekilen parçanın zımbadan sıyrılması	27
Şekil 2.10. Gererek eğme yöntemlerinin işlem ilkelerinin şematik görünümü: (a) açık kol tipi; (b) rotasyon kolu tipi; (c) tek yönden döner tipi; (d) çift yönden döner tipi (Ma ve Welo, 2021).....	28
Şekil 2.11. Plastik deforme olmuş bir malzemenin toparlanma safhasında çeşitli aşamalar (Humphreys ve ark., 2017).	30
Şekil 2.12. Bir malzemenin sıcak deformasyonu sırasında mikroyapının gelişimi (a) dinamik toparlanma (b) dinamik yeniden kristallenme.....	32
Şekil 2.13. %93 oranında soğuk haddelenmiş arklı başlangıç tane boyutlarına sahip bakırın 225 °C sıcaklıkta yeniden kristallenme kinetiği etkisi	33
Şekil 2.14. 350°C'de tavllanmış alüminyumun yeniden kristallenme kinetiği	34
Şekil 2.15. Tane büyümesinde, tane boyutu dağılımındaki değişikliğin şematik gösterim (a) Normal tane büyümesi; (b) Anormal tane büyümesi	36
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AA5005 saclar	38
Şekil 3.2. Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskop görüntüsü	41

Şekil 4.1. 5x büyütme altında 4,16 mm kalınlıktaki numune metalografik görüntüsü	42
Şekil 4.2. 5x büyütme altında 2,99 mm kalınlıktaki numune metalografik görüntüsü	42
Şekil 4.3. 5x büyütme altında 1,97 mm kalınlıktaki numune metalografik görüntüsü	43
Şekil 4.4. $\epsilon = 0,33$ olan AA5005 sacların DSC analizi	44
Şekil 4.5. $\epsilon = 0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği	45
Şekil 4.6. $\epsilon = 0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği (Boswell modeli)	45
Şekil 4.7. $\epsilon = 0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği (Ozawa modeli).	46
Şekil 4.8. $\epsilon = 0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^{1,92}) - 1000/T$ grafiği (Starink modeli).....	46
Şekil 4.9. $\epsilon = 0,33$ olan AA5005 sacı için Y – 1000/T grafikleri (Y = Kissenger için $\ln(\beta/T^2)$; Boswell için $\ln(\beta/T)$; Ozawa için $\ln(\beta)$; Starink için $\ln(\beta/T^{1,92})$)	47
Şekil 4.10. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacların DSC analizi	48
Şekil 4.11. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği (Kissenger modeli)	49
Şekil 4.12. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği (Boswell modeli)	49
Şekil 4.13. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği (Ozawa modeli)	50
Şekil 4.14. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^{1,92}) - 1000/T$ grafiği (Starink modeli).....	50
Şekil 4.15. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için Y – 1000/T grafikleri (Y = Kissenger için $\ln(\beta/T^2)$; Boswell için $\ln(\beta/T)$; Ozawa için $\ln(\beta)$; Starink için $\ln(\beta/T^{1,92})$)	51

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. 5005 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (w1).....	1
Tablo 2.1. Alüminyum ve Özellikleri	4
Tablo 2.2. Alüminyumun gelişim tarihçesi gösterilmektedir.....	5
Tablo 2.3. Dövme alüminyumun alaşımlarının sınıflandırılması	10
Tablo 2.4. Kum, kalıcı kalıp ve kalıp döküm olarak yeniden eritilecek külçeler için alaşım elementi ve safsızlık özellikleri.....	11
Tablo 2.5. Metal deformasyon yöntemleri ve etkileri.....	18
Tablo 2.6. Çeşitli ekstrüzyon alaşımlarının ekstrüzyonu için örnek veriler	23
Tablo 2.7. Yeniden kristallenme ile toparlanma arasındaki farklar	31
Tablo 2.8. Yeniden kristallenmeye etkileyen faktörler.....	32
Tablo 2.9. Yeniden kristallenme sıcaklığına saflığın etkisi	34
Tablo 4.1. $\varepsilon = 0.33$ olan AA5005 sacı için kinetik veriler	44
Tablo 4.2. $\varepsilon = 0.33$ olan AA5005 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.....	47
Tablo 4.3. $\varepsilon = 0.747$ olan AA5005 sacı için kinetik veriler	48
Tablo 4.4. $\varepsilon = 0.747$ olan AA5005 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.....	51

ÖZET

Anahtar kelimeler: AA5005 Alüminyum alaşımı, yeniden kristallenme, izotermal olmayan kinetik

Bu çalışmada, Akyazı-Sakarya’da bulunan ASAŞ Alüminyumdan temin edilen soğuk haddelenmiş AA5005 alüminyum alaşım levhalarının izotermal olmayan kinetik çalışması termal analiz kullanılarak incelenmiştir. AA5005 alüminyum alaşımı levhalarından elde edilen soğuk haddelenmiş numunelerin termal analizi, farklı ısıtma hızlarında (10–15–20–25°C/dak) diferansiyel tarama kalorimetri (DSC) ile yapılmıştır. Numunelerin izotermal olmayan yeniden kristallenme kinetiği Kissinger, Boswell, Ozawa ve Starink denklemleriyle yapılmıştır. Bunlar modelsiz yöntemlerdir. Farklı ısıtma hızlarındaki derivatif tarama kalorimetri dataları kullanılarak yeniden kristallenme sıcaklıkları tespit edilmiş ve aktivasyon enerjileri $Y-1/T$ diyagramlarındaki eğimlerden hesaplanmıştır. Burada Y , Kissinger için $\ln(\beta/T^2)$, Boswell için $\ln(\beta/T)$, Ozawa için $\ln(\beta)$ ve Starink için $\ln(\beta/T^{1.92})$ ‘dir. Kinetik sonuçlar göstermiştir ki dört izotermal olmayan kinetik modele göre %33 deforme olmuş AA5005 levha için yeniden kristallenme aktivasyon enerjisi 147–158 kJ/mol aralığındadır ve %74,7 deforme olmuş AA5005 için bu değer 194–206 kJ/mol aralığındadır.

INVESTIGATION OF RECRYSTALLIZATION KINETICS OF AA5005 SHEETS AFTER ROLLING BY THERMAL ANALYSIS

SUMMARY

Keywords: AA5005 Aluminum alloy, recrystallization, non-isothermal kinetics

In this study, the non-isothermal crystallization kinetics of cold rolled AA5005 aluminum alloy sheets obtained from ASAŞ Aluminum in Akyazı-Sakarya was studied by using thermal analysis. The thermal analysis of cold rolled samples from AA5005 aluminum alloy sheets were performed by differential scanning calorimetry (DSC) with different heating rates (10–15–20–25°C/min). The non – isothermal recrystallization kinetics of samples was performed by using Kissenger, Boswell, Ozawa and Starink equations. These are model – free methods. Using derivative scanning calorimetry data at different heating rates (β), recrystallization temperatures were deduced and activation energies were calculated from the slopes from $Y-1/T$ diagrams. Y is $\ln(\beta/T^2)$ for Kissenger, $\ln(\beta/T)$ for Boswell, $\ln(\beta)$ for Ozawa and $\ln(\beta/T^{1.92})$ for Starink. The kinetics results showed that the activation energy of recrystallization for 33% deformed AA5005 sheet is in the range of 147–158 kJ/mol and this value for 74,7% deformed AA5005 is in the range of 194–206 kJ/mol, according to four non-isothermal kinetics model.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Aluminyum 5005 alaşımları atmosferik ortamda çok iyi korozyon direncine, çok iyi bir kaynak kabiliyetine sahip, dekoratif eloksal için çok uygun olan, şekillendirilebilen orta kuvvette bir alaşımdır. Genel olarak kimyasal bileşimi Tablo 1.1.'de verilmiştir.

Tablo 1.1. 5005 aluminyum alaşımının kimyasal bileşimi (w1)

Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Diğer
96,65-97,7	0,7	0,3	0,2	0,2	0,05-1,1	0,25	0,1	0,5

5005 Aluminyum alaşımlarının kullanıldığı alanlar;

- Dış cephe uygulamaları, çatı ve oluklu levha olarak inşaat sektörü
- Denizcilik ve açıkdeniz yapıları
- Gıda ve kimya sektörü
- Reklam panoları
- Yollarda işaret levhaları
- Eloksallı parçalar
- Ambalaj sektörü
- Soğutucu ve ısıtıcı ekipmanları
- Boru ve Tüp (w1,2021)

Metal esaslı malzemelerin döküm işlemleri gerçekleştirildikten sonra haddemele gibi plastik şekil verme yöntemi ile ara veya nihai ürünlere dönüştürülürler. Haddemele işlemi sıcak veya soğuk olabilir. Birçok metal ve alaşımlarının şekil verme işlemlerinde parçayı kırmadan veya yırtmadan oluşturulabilecek şekil değiştirme miktarının bir sınırı vardır. Bu nedenle parçalar yeniden kristallenme işlemine tabi tutulurlar ve yeni taneler elde edilir. Bu işlem sonrası parçalar ileri kademede şekil değişimine uygun hale gelirler. Yeniden kristallenme işlemi ile dislokasyonların

büyük ölçüde giderilmesi sağlanır. Dislokasyonlar çoğunlukla tane sınırlarına, boşluklara ve yüzey bölgelerine çıkarak kaybolurlar. Karşılaştıkları zıt işaretli dislokasyonlar tarafından yok edilirler. İfade edilen durumlardan hiçbirini yapamayan dislokasyonlar da şekil veya yapı değişimine doğru eğilim gösterirler (Kavaklıoğlu, 2013).

Soğuk şekil değiştirme işlemleri görmüş metalik malzemelerde yeniden kristallenme kinetiğinin incelenmesinde en çok kullanılan dört yöntem Kissenger, Ozawa, Boswell ve Starink olup bu yöntemler izotermal olmayan koşullar altında alınan termal analiz verilerinde bulunan pik sıcaklıklarının kullanılması esasına dayanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Akyazı/Sakarya'da bulunan ASAŞ Alüminyum fabrikasından farklı mertebelerde soğuk haddelenmiş AA5005 alüminyum saclarında yeniden kristallenme kinetiği, modelsiz ve izotermal olmayan yöntemler olan Kissenger, Boswell, Ozawa ve Starink yöntemleriyle incelenmiştir.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Alüminyum ve Alaşımaları

Alüminyum yerkürede en çok bulunan ikinci metal olup, 19. yüzyılın sonlarında mühendislik uygulamalarında ekonomik bir rakip haline gelmiştir. Alüminyum ve alaşımlarının benzersiz nitelikleriyle tutarlı malzeme özellikleri kılarak, yeni metalin üretimi ve kullanımındaki büyümeye önemli fayda sağlamaktadır.

Alüminyum için ilk ticari uygulamalar, ayna çerçeveleri, ev numaraları ve servis tepsi gibi yenilik ürünleriydi. Yemek pişirme kapları da erken dönemde önemli bir pazardı. Zamanla, alüminyum, modern yaşamın neredeyse her yönünde, kullanımı doğrudan veya dolaylı olarak, uygulama çeşitliliği büyümektedir (ASM, 1992).

2.1.1. Alüminyum özellikleri

Alüminyum dayanım ve hafiflik özelliklerine sahiptir. Bu nedenle uzun yıllardır havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Fosil yakıt kaynaklarının azalması, gaz salınımının artması ve çevresel kaygılar, taşıtlarda hafiflik anlayışının gelişmesine yol açmıştır (Ölmez ve Keleşoğlu, 2016).

Alüminyum, kimyasal sembolü Al olan metalik bir elementtir. Atom numarası 13 ve atom ağırlığı 27 olup atom çekirdeği 13 proton ve 14 nötron içerir (toplam 27 kuark). Alüminyum, yer kabuğunda oksijen ve silisten sonra gelen en yaygın üçüncü elementtir. Yer kabuğunun toplam kütlelerinin % 8'ini oluşturur ve en bol bulunan metaldir (Dwight, 1999).

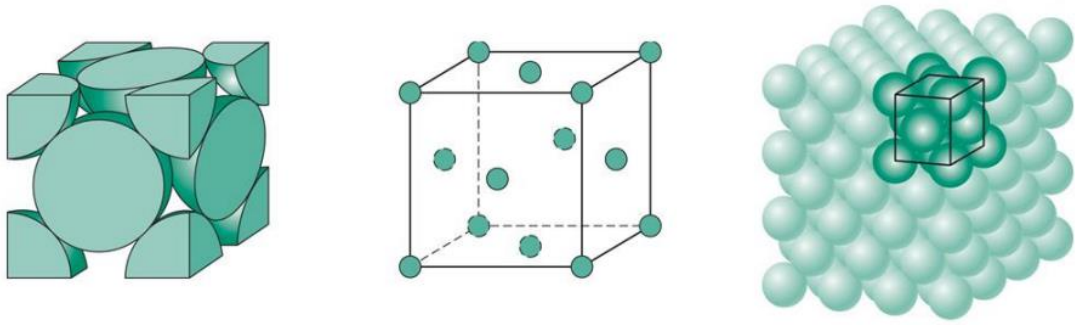
Alüminyum, dört atomlu, yüzey merkezli kübiktir. 870°K ve 350°K'de allotropi dönüşümleri, özellik değişikliklerindeki süreksizlikleri açıklamaktadır, ancak daha saf metal üzerine yapılan sonraki araştırmalar, normal basınçlarda 4°K'den erime noktasına, allotropi dönüşümü olmadığını kanıtladı (Mondolfo, 1976). Tablo 2.1.'de Alüminyumun bazı özellikleri bulunmaktadır.

Tablo 2.1. Alüminyum ve Özellikleri (Töre, 2012).

Özellik	Değer
Yoğunluk	2,70 g/cm ³
Periyodik Cetveldeki Konumu	3A
Atom Ağırlığı	26,981538 g/mol
Atom Çapı	1,43 Å
Ergime Sıcaklığı	660 °C
Isıl İletkenlik Katsayısı	247 W/m-K
Kristal Çeşidi	Kübik Yüzey Merkezli
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	250 – 300°C
Isı İletkenlik Katsayısı	247 W/m-K
Elektrik İletkenliği	38,1 m/Ω-mm ²
Elastite Modülü	69000 N/mm ²
Akma Sınırı	90 – 500 N/mm ²

Alüminyum, çevre dostu, zehirli bileşen içermeyen, kolay kullanım özelliğine sahip ve geri dönüştürülmesi kolay olan bir elementtir. Düşük yoğunluğa sahip olması ve hafifliği nedeniyle iletken amaçlı olarak kullanılmasında da tercih edilmektedir. Alüminyum geniş bir alaşım grubuna sahiptir ve mukavemeti 9 kg/mm'den, 70 kg/mm'ye kadar alaşım türüne göre değişebilmektedir..

Kafes parametresinin en olası değeri 298 °K'de $4.049\ 596 \times 10^{-10}$ m'dir. Bu değerden alüminyumun atomik çapı 2.86×10^{-10} m ve atomik hacim $999.6\ \text{mm}^3/\text{g}$ olarak hesaplanabilir (Mondolfo, 1976). Şekil 2.1.'de alüminyum metali için kafes atomların dizilimi görülmektedir.



Şekil 2.1. Alüminyum atomik dizilişi (Kristal yapısı)

2.1.2. Alüminyumun tarihçesi

Alüminyumun tarihi 1800'lü yıllara kadar gitmektedir. O zamandan bu yana en önemli mühendislik malzemelerinden biri olma özelliği devam etmektedir. Binlerce yıla sahip olduğumuz bronz, bakır, kurşun, demir vb. kıyasladığımızda alüminyum, icat edildiğinden beri ciddi bir endüstriyel metal olmuştur ve günümüzde demir dışı metallerin hacimsel olarak kullanılmasına kolaylıkla öncülük etmektedir. Mevcut dünya tüketimi yılda yaklaşık 20 milyon tondur (Dwight, 1999).

Tablo 2.2. Alüminyumun gelişim tarihçesi gösterilmektedir (Ölmez, 2016).

Yıl	Olay
1821	Fransa'nın Les Baux köyünde %52 oranında alüminyum oksit içeren kırmızı renkli toprak bulunması ve bu maden isminin yerleşim yerine istinaden "BAUXITE – boksit" olarak verilmesi
1827	WOHLER tarafından Almanya'da potasyumla susuz alüminyum klorürü tepkimeye sokup toz alüminyum elde edilmesi
1845	WOHLER tarafından alüminyumun yoğunluğunun 2700 kg/m ³ olarak tespit edilmesi
1854	H. SAINTE ve C. DEVILLE tarafından Fransa'da ilk ticari alüminyum üretimini gerçekleştirilmesi
1855	Paris Dünya Sergisinde alüminyumun geniş kitlelerle tanışması
1886	P. HEROLT ve C. HALL isimli araştırmacıların birbirinden bağımsız olarak alüminyum üretimini elektroliz yöntemiyle yapması (Herolt – Hall yöntemi)
1888	İlk alüminyum sektörlerinin Fransa, İsviçre, Amerika'da kurulması
1889	F. BAYER (Avusturya) tarafından alümina üretimi için Bayer prosesinin geliştirilmesi

2.1.3. Alüminyum avantajları ve dezavantajları

Alüminyumun en çarpıcı özelliklerinden biri çok yönlü olmasıdır. Yüksek saflıktaki alüminyumdan tüm alaşımlarına kadar geliştirilebilen fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir (ASM, 1992).

Alüminyumun avantajları;

- Hafiflik: Alüminyum hafiftir, çeliğin ağırlığının üçte biridir.
- Paslanmayan: Alüminyum paslanma yapmaz ve normalde boyasız olarak kullanılabilir, ama bununla birlikte, en güçlü alaşımlar bazı düşman ortamlarda aşınır ve korunmaya ihtiyaç duyabilir.
- Ekstrüzyon süreci: Alüminyum profil üretmenin standart yolu olan bu teknik, çelikteki haddeleme prosedürlerinden çok daha yönlüdür. Alüminyum tasarımında önemli bir özelliktir.
- Kaynak kabiliyeti: Alaşımların çoğu, gaz korumalı işlemler kullanılarak çelik kadar kolay ark kaynağı yapılabilir. Ayrıca kaynak hızları daha seridir.
- İşlenebilirlik: Mümkün olan yüksek talaş kaldırma oranları nedeniyle frezeleme, alüminyum için ekonomik bir imalat tekniği kılabilir.
- Yapıştırıcılık kabiliyeti: Yapıştırıcı bağlamanın kullanımı, alüminyumda yapısal ek yerleri bağlamak için geçerli bir yöntem olarak yer almaktadır.
- Düşük sıcaklıklarda performansı: Alüminyum, kriyojenik uygulamalar için son derece uygundur, çünkü çeliğin olduğu gibi düşük sıcaklıkta gevrek kırılmaya eğilimli değildir. Mekanik özellikleri ise, sıcaklık düştükçe sürekli iyileşir (Dwight, 1999).

Alüminyumun dezavantajları;

- Maliyet: Alüminyum için metal maliyeti (bölümler, levha) hacim olarak inşaat çelik hacminin tipik olarak yaklaşık 1.5 katıdır. Uçak sınıfı malzeme için fark daha fazladır.

- Burkulma: Düşük elastisite modülü nedeniyle, bir alüminyum bileşenin burkulma sebebiyle kırılma yükü, aynı boyuta sahip bir çelik için daha düşüktür
- Sıcaklığın etkisi: Alüminyum, artan sıcaklıkla birlikte çelikten daha çabuk zayıf hale gelir. Bazı alaşımlar 100 °C'nin üzerinde çalışırken güç kaybetmeye başlar.
- Yorulma: Alüminyum alaşımları, çelik alaşımlara göre yorulma nedeniyle hasara uğramasına daha yatkındır.
- Termal Genleşme: Alüminyum, çeliğe göre iki kat daha fazla sıcaklıkla genişler ve büzülür. Sıcaklık gerilmeleri ise düşük elastisite modülü nedeniyle, çelikte olanın yalnızca üçte ikisi kadardır.
- Elektrolitik korozyon: Doğru önlemler alınmazsa, diğer metallerle birleşim yerlerinde alüminyumda ciddi korozyon meydana gelebilir. Oldukça dayanıklı olan alaşımlar kullanıldığında bile geçerlidir.
- Standart Sapma: Düşük elastisite modülü nedeniyle, elastik sapma çelikte kıyasen daha önemli bir faktör haline gelir.
- Kaynaklarda HAZ yumuşaması: Bazı alaşımlardaki kaynaklı bağlantılarda ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) ciddi bir bölgesel güç düşüşü olma eğilimindedir (Dwight, 1999).

2.1.4. Alüminyum saflığı

Birincil alüminyum, normalde% 99 ile % 99,999 arasında değişen çeşitli sınıflarda üretilir. Farklı üretim yöntemlerine karşılık gelen üç farklı tip ayırt edilebilir:

- Ticari Saflıkta Alüminyum, elektrolitik hücrede Al_2O_3 'in indirgenmesinden elde edilen metaldir ve ticari üretimin büyük kısmını oluşturur. % 1'e kadar safsızlık içerebilir ve çok nadiren % 99.9 saflığı aşar.
- Rafine Alüminyum, ticari olarak saf metalin üç katmanlı hücrede elektro rafine edilmesiyle üretilir. Saflığı %99,9 ile %99,99 arasında değişmektedir.
- Bölge Rafine Alüminyum, bölge rafine edilerek üretilir ve uygun başlangıç malzemesi ve tekniği ile 1 ppm'den daha az safsızlık içeren metal üretebilir.

Bu saflık, organik banyolardan elektro biriktirilmiş metalin bölge rafine edilmesi ile üretilir (Mondolfo, 1976).

İkincil alüminyum, fabrikasyon hurdalarının veya eski ekipmanların yeniden eritilmesiyle üretilir ve genellikle alaşımlar şeklinde geri kazanılır. Elektrik kablosu gibi yüksek kaliteli hurda yeniden eritildiğinde bile, ortaya çıkan ikincil saf alüminyum, diğer malzemelerle kaçınılmaz kirlenme nedeniyle karşılık gelen birincil olandan daha az saftır (Mondolfo, 1976).

2.1.5. Alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımlarının yapısal malzeme olarak uygulanması, olumlu özellikleri nedeniyle son yıllarda artmıştır: örn. yüksek mukavemet / ağırlık oranı, imalat kolaylığı, yüksek derecede işlenebilirlik, önemli derecede süneklik, mükemmel ısı iletkenlik, yüksek korozyon direnci ve doğal yüzeylerinde çekici görünüm. Bu nedenle, küresel alüminyum üretiminin% 25'i şu anda inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Ekstrüzyon kolaylığı, alüminyum alaşımlarını, beton veya çelik gibi daha geleneksel yapısal malzemelerden geliştirilemeyen yapılar için uygun, karmaşık kesit şekillerinin üretimine izin veren çok yönlü bir yapısal malzeme haline getirir. Belirgin korozyon direnci; onları yüzey koruması olmayan ve düşük bakım maliyeti ile deniz ortamlarındaki uygulamalar için uygun hale getirir. Mükemmel dayanıklılıkları, büyük sıcaklık değişimlerinde bile doğal özelliklerini koruyabilen yapılara olanak tanır (Georgantzia ve ark., 2020).

2.1.5.1. Alüminyum alaşımların sınıflandırması

Alüminyum alaşımları döküm ve dövme alaşımlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Birçok alaşım, faz yapılarına bağlı olarak ısı işleme tabi tutulabilir. Bu ısı işlemler, çözeltiye alma, su verme ve çökeltme veya yaşlandırma, sertleştirmeyi içerir. Döküm veya dövme alaşımlar ısı işleme tabi tutulabilir olarak kabul edilir (ASM, 1992).

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında en çok kullanılanı Alüminyum Birliğinin (Aluminum Association) standardıdır (Töre, 2012). Ayrıca herhangi bir malzeme için iki kısımlı bir referans numarası kullanılır (örnek 3103-H14, 6082-T6 veya 5083-0). Kısa çizginin önündeki dört rakamlı sayı alaşımı tanımlar ve ondan sonraki semboller, bu alaşımın tedarik edildiği koşulu (veya tavlamasını) tanımlar (Dwight, 1999).

Alüminyum alaşımları ısı işlem görebilir veya görmeyebilir diye ayrılabilir. Birincisi, bir H alfabetiyle tanımlanan (yukarıdaki ilk örnekte olduğu gibi), bir işlemle sertleştirilmiş, ikincisi ise bir T alfabeti ile belirtilen çeşitli ısı işlem koşullarından geçtiğini ifade eder.

2.1.5.2. Dövme alüminyum alaşımları

Kütük (ingot) şeklindeki alüminyum alaşımı döküm parçasının plastik şekil verme yöntemleriyle elde edilen nihai ürüne dövme alüminyum alaşımları denilmektedir. Bu alaşımlar dövme, haddeleme veya ekstrüzyon yöntemleri gibi plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmektedirler (ASM, 1992).

Alüminyum Birliği tarafından geliştirilmiş simgeleme metodu dört rakamdan (XXXX) oluşmaktadır. Dört rakamlı (XXXX) sayısının, ilk rakamı; alaşımın sahip olduğu temel alaşım elementini vermektedir.

1XXX serideki malzemeler, ticari olarak saf alüminyumun az %99,00 içerir. Referans numarasındaki üçüncü ve dördüncü rakamlar, %99,00 ve üzerindeki minimum alüminyum yüzdesini göstererek saflığın derecesini tanımlar (Dwight, 1999).

2XXX ila 8XXX alaşım gruplarında, atamadaki ikinci rakam alaşım modifikasyonunu gösterir. İkinci rakam sıfır ise, orijinal alaşımı gösterir; Art arda atanan 1'den 9'a kadar olan tam sayılar, orijinal alaşımdaki değişiklikleri gösterir. Önerilen bir bileşimin yalnızca önceden kaydedilmiş bir alaşımın bir modifikasyonu olup olmadığını veya tamamen yeni bir alaşım olup olmadığını belirlemek için açık kurallar oluşturulmuştur.

2XXX ila 8XXX gruplarındaki dört hanenin son ikisinin özel bir önemi yoktur, ancak yalnızca gruptaki farklı alüminyum alaşımlarını tanımlamaya hizmet eder (ASM, 1992).

Dövme alüminyum alaşımlarında; :

- 1XXX Kontrollü alaşımsız (saf) bileşimler
- 2XXX Bakırın temel alaşım elementi olduğu alaşımlar
- 3XXX Manganezin temel alaşım elementi olduğu alaşımlar. Bu alaşımların nispeten düşük manganez içeriği, bazen ilave magnezyum ile birlikte, korozyona karşı çok yüksek bir direnci korurken, onları saf alüminyumun yarısı kadar güçlü kılar.
- 4XXX Silisyum temel alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- 5XXX Magnezyumun temel alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- 6XXX Magnezyum ve silisyum temel alaşım elementleri olduğu alaşımlar.
- 7XXX Çinkonun temel alaşım elementi olduğu alaşımlar. Bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi elementler de yer alabilir.
- 8XXX Kalay ve lityum bileşimleri içeren alaşımlar.
- 9XXX İleride kullanım için ayrılmıştır (ASM, 1992).

Tablo 2.3. Dövme alüminyumun alaşımlarının sınıflandırılması (Ölmez, 2016).

Seri No	Alaşım Elementi
1XXX	-
2XXX	Bakır
3XXX	Mangan
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Silisyum - Magnezyum
7XXX	Çinko
8XXX	Diğer Elementler (Kalay ve Lityum vs.)
9XXX	Kullanılmayan Seri

2.1.5.3. Dökme alüminyum alaşımları

Genellikle kum kalıba döküm, basınçlı döküm ve kokil kalıba döküm yöntemleri kullanılarak üretilirler. Döküm alüminyum alaşımlar, yüksek fiziksel özellikler

göstermekte olup işlenmeye elverişlidir. Çoğu döküm alüminyum alaşımları kaynak edilebilme özelliğine de sahiptirler.

1XX.X grubu için, atamadaki dört haneden ikinci ikisi minimum alüminyum yüzdesini gösterir. Bu rakamlar, en yakın % 0,01 olarak ifade edildiğinde minimum alüminyum yüzdesindeki ondalık noktanın sağındaki iki rakamla aynıdır. Son rakam ürün formunu gösterir: 1XX.0 dökümleri ve 1XX.1 ingotu gösterir.

2XX.X ila 9XX.X alaşım grupları için, atamadaki dört haneden ikinci ikisinin özel bir önemi yoktur, ancak gruptaki farklı alaşımları tanımlamaya hizmet eder. Ondalık noktanın sağındaki son rakam ürün formunu gösterir: XXX.0 dökümleri gösterir ve XXX.1, alaşım elementleri için limitlere sahip olan ingot, döküm formundaki alaşımlar için olanlarla aynıdır, yalnız aşağıdaki Tablo 2.4.'de verilenler hariçtir (ASM, 1992).

Tablo 2.4. Kum, kalıcı kalıp ve kalıp döküm olarak yeniden eritilecek külçeler için alaşım elementi ve safsızlık özellikleri (ASM, 1992).

Alaşım elementi	Bileşim, ağırlıkça %			Külçe (Ingot)
	Döküm			
	Kum ve kalıcı kalıp	Basıncılı döküm	Tüm döküm metodları	
Demir	≥0.15	...	...	Döküm -0.03
	>0.15-0.25	...	...	Döküm -0.05
	>0.25-0.6	...	...	Döküm -0.10
	>0.6-1.0	...	...	Döküm -0.2
	>1.0	...	...	Döküm -0.3
	...	≤1.3	...	Döküm -0.3
	...	>1.3	...	≤1.1
Magnezyum	...	...	<0.50	Döküm +0.05 ^(a)
	...	...	≥0.50	Döküm +0.1 ^(a)
Çinko	...	>0.25-0.60	...	Döküm -0.10
	...	>0.60	...	Döküm -0.1

(a) Yalnızca dökümler için belirtilen aralık > % 0,15 Mg olduğunda uygulanabilir

Döküm bileşimleri için alaşım aileleri aşağıdaki gibidir:

- 1XX.X Kontrollü alaşımsız (saf) bileşimler. En az %99 alüminyum içeren alüminyum alaşımıdır. Isıl işleme uygun değildir (ASM, 1992; Can, 2006).
- 2XX.X Bakırın temel alaşım elementi olduğu alaşımlar, ancak diğer alaşım elementleri belirtilebilir (ASM, 1992).

- 3XX.X Silisyum temel alaşım elementi olduğu alaşımlar. Kullanılan alüminyum döküm alaşımlarının çoğu bu serideki alaşımlardır. Bu seri ısıl işleme uygun alüminyum döküm serisidir (ASM, 1992; Can, 2006).
- 4XX.X Bu döküm alaşımlarında ağırlıkça silisyum temel alaşımın elementidir.
- 5XX.X Magnezyumun temel alaşım elementi olduğu alaşımlardır.
- 6XX.X Bu seri alüminyum alaşımları kullanılmamaktadır.
- 7XX.X Çinkonun temel alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- 8XX.X Kalayın temel alaşım elementi olduğu alaşımlardır (ASM, 1992).

2.1.5.4. Alüminyum alaşımlarına elementlerin etkileri

Antimon: birincil ticari sınıf alüminyumda az miktarlarda (0.01 ile 0.1 ppm) bulunur. Antimon alüminyumda çok küçük bir katı çözünürlüğe sahiptir (<% 0.01). Alüminyum magnezyum alaşımlarına, koruyucu bir tabaka filmi oluşturarak tuzlu suda korozyon direncini arttırır. Alüminyum magnezyum alaşımlarında sıcak çatlamayı önlemek için bizmut yerine antimon kullanılabilir (ASM, 1992).

Arsenik: AsAl bileşiği bir yarı iletkenidir. Arsenik çok zehirlidir (AsO₃ olarak) ve alüminyumun gıda ambalajında folyo olarak kullanıldığı yerlerde iyice kontrol edilmelidir (ASM, 1992).

Bakır: genellikle diğer ilavelerle birlikte % 2 ile % 10 Cu içeren alüminyum-bakır alaşımları, önemli alaşım aileleri oluşturur. Hem döküm hem de işlenmiş alüminyum-bakır alaşımları, çözelti ısıl işleme ve ardından yaşlanmaya, mukavemet ve sertlikte bir artış ve uzamada ise bir azalma ile yanıt verir (ASM, 1992). Alüminyum alaşımlarında sertlik, dayanım, yüksek dökülebilirlik ve işlenebilme kolaylığı gibi özellikleri kazandırırken süneklıği ve korozyon direncini düşürür (Töre, 2012).

Berilyum: magnezyum içeren alaşımlarda yüksek sıcaklıklardaki oksidasyonu azaltmak için kullanılır. Alüminyum filmin yaşmasını iyileştirmek ve zararlı demir-alüminyum kompleksinin oluşumunu sınırlamak için çelik için alüminize

banyolarında % 0.1'e kadar Be kullanılır. Koruma mekanizması, yüzeye berilyum difüzyonuna ve koruyucu bir tabaka oluşumuna atfedilir (ASM, 1992).

Çinko: döküm alaşımlarının sıcak çatlaması ve işlenmiş alaşımların gerilme korozyonu çatlamasına duyarlılığı, kullanımlarını kısıtlamıştır. Diğer elementleri içeren alüminyum-çinko alaşımları, dövme alüminyum alaşımlarında en yüksek çekme özelliklerini sunar. Yukarıda bahsedilen sınırlamaların üstesinden gelme çabaları başarılı olmuştur ve bu alüminyum-çinko bazlı alaşımlar ticari olarak artan ölçüde kullanılmaktadır. Alüminyumda çinkonun varlığı çözelti potansiyelini, dolayısıyla koruyucu kaplamada (7072) ve kurban anotlarda kullanımını artırır (ASM, 1992).

Demir: alüminyumda bulunan en yaygın safsızlıktır. Erimiş alüminyumda yüksek çözünürlüğe sahiptir ve bu nedenle üretimin tüm eriyik aşamalarında kolayca çözünür. Katı haldeki demirin çözünürlüğü çok düşüktür (% 0.04) ve bu nedenle, alüminyumda bu miktarın üzerinde bulunan demirin çoğu, alüminyum ve çoğu zaman diğer elementlerle kombinasyon halinde metaller arası ikinci faz olarak görünür. Sınırlı çözünürlüğü nedeniyle, orta derecede yüksek sıcaklıklarda mukavemette hafif bir artış sağlar. Yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artırmak için alüminyum bakır nikel alaşım grubuna demir eklenir (ASM, 1992).

Fosfor: ticari sınıf alüminyumda küçük bir safsızlıktır (1 ile 10 ppm). Erimiş alüminyumdaki çözünürlüğü çok düşüktür ve katı içinde önemli ölçüde daha küçüktür. Fosfor, alüminyum-fosfidin birincil silisyum için çekirdek görevi gördüğü, böylece silisyumu rafine ettiği ve işlenebilirliği geliştirdiği hiperötektik alüminyum- silisyum alaşımları için bir modifiye edici olarak kullanılır. Alüminyum-fosfor bileşiği su buharı ile reaksiyona girerek fosfin (PH₃) verir, ancak alüminyumdaki fosfor seviyesi yeterince düşüktür ki, fosfor çekirdekli dökümler işlenirken yeterli havalandırma kullanılırsa bu bir sağlık tehlikesi oluşturmaz (ASM, 1992).

Gümüş: alüminyumda son derece yüksek bir katı çözünürlüğe sahiptir (% 55'e kadar). Maliyet nedeniyle, ikili alüminyum-gümüş alaşımları kullanılmamaktadır, ancak

küçük eklemeler (% 0,1 ile 0,6 Ag), alüminyum-çinko-magnezyum alaşımlarının mukavemetini ve gerilme-korozyon direncini iyileştirmede etkilidir (ASM, 1992).

Kalsiyum: alüminyumda çok düşük çözünürlüğe sahiptir ve intermetalik $CaAl_4$ oluşturur. Yaklaşık% 5 Ca ve% 5 Zn içeren ilginç bir alaşım grubu süperplastik özelliklere sahiptir. Kalsiyum, alüminyumda neredeyse çözünmeyen $CaSi_2$ oluşturmak için silikonla birleşir ve bu nedenle ticari sınıf metalin iletkenliğini biraz artıracaktır. Alüminyum-magnezyum-silikon alaşımlarında kalsiyum yaşla sertleşmeyi azaltacaktır. Alüminyum-silikon alaşımları üzerindeki etkisi mukavemeti arttırmak ve uzamayı azaltmaktır, ancak bu alaşımları ısıl işleminden geçirilebilir hale getirmez (ASM, 1992).

Krom: ticari saflıkta alüminyumda (5 ila 50 ppm) küçük bir safsızlık olarak ortaya çıkar. Elektrik direnci üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Krom, alüminyum-magnezyum, alüminyum-magnezyum-silisyum ve alüminyum-magnezyum-çinko gruplarının birçok alaşımına genel olarak% 0.35'i geçmeyen miktarlarda eklendiği yaygın bir süreçtir. Bu sınırların aşılması durumunda, manganez, demir ve titanyum gibi diğer eklemeler ile çok kaba bileşenler oluşturma eğilimindedir. Döküm alaşımlarında, fazla krom eklenirse, bekletme sırasında peritektik çökeltme yoluyla bir çamur üretecektir (ASM, 1992).

Kükürt: Ticari sınıf alüminyumda 0,2 ile 20 ppm kükürt bulunur. Kükürdün hem hipohem de hiperötektik alüminyum-silisyum alaşımlarını modifiye etmek için kullanılabilceği bildirilmiştir (ASM, 1992).

Hidrojen: erime noktasında sıvı halde aynı sıcaklıktaki katıya göre daha yüksek bir çözünürlüğe sahiptir. Bu nedenle katılaşma sırasında gaz gözenekliliği oluşabilir. Hidrojen, atmosferdeki su buharının alüminyum tarafından indirgenmesi ve hidrokarbonların ayrışması ile üretilir. Hem katı hem de sıvı alüminyumdaki hidrojen toplanması, yüzeyde ve atmosferde kükürt bileşikleri gibi belirli safsızlıkların varlığıyla artar. Metalde hidrit oluşturan elementler, sıvıdaki hidrojenin toplanmasını

arttırır. Berilyum, bakır, kalay ve silikon gibi diğer elementler hidrojen alımını azaltır (ASM, 1992).

Lityum: Lityumun safsızlık seviyesi birkaç ppm düzeyindedir, ancak 5 ppm'den daha düşük bir seviyede, nemli koşullar altında alüminyum folyonun renk değişimini (mavi korozyon) teşvik edebilir. Lityum kalıntıları, erimiş alüminyumun oksidasyon oranını büyük ölçüde artırır ve işlenmiş ürünlerin yüzey özelliklerini değiştirir. İkili alüminyum-lityum alaşımları yaşanır ancak ticari olarak kullanılmaz (ASM, 1992).

Magnezyum: 5XXX serisi alaşımların ana alaşım elementidir. Alüminyumdaki maksimum katı çözünürlüğü % 17.4'tür, ancak mevcut işlenmiş alaşımlardaki magnezyum içeriği % 5.5'i geçmez. Magnezyum, taneler arası çatlamaya ve gerilme korozyonuna duyarlılık oluşturan, oldukça anodik bir faz (Mg_5Al_3 veya Mg_5Al_8) olarak tercihen tane sınırlarında çökler. % 5'e kadar uygun şekilde üretilmiş Mg içeren dövme alaşımlar, normal kullanım altında stabildir. Magnezyum ilavesi, sünekliği gereksiz yere düşürmeden alüminyumun mukavemetini önemli ölçüde artırır. Ayrıca Korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti de iyi seviyeye çıkarır (ASM, 1992).

Manganez: Konsantrasyonu normalde 5 ile 50 ppm arasında değişen birincil alüminyumda yaygın bir safsızlıktır. Dirençliliği azaltır. Manganez ya katı çözelti içinde ya da ince bir şekilde çöktürülmüş metaller arası faz olarak mukavemeti artırır. Korozyon direncine olumsuz etkisi yoktur. Manganez, normal safsızlıkların varlığında alüminyumda çok sınırlı bir katı çözünürlüğe sahiptir, ancak soğuk döküldüğünde çözelti içinde kalır, böylece eklenen manganezin çoğu, büyük külçelerde bile büyük ölçüde çözelti içinde tutulur. Ek olarak, mukavemeti arttırmak ve tane yapısını kontrol etmek için kullanılır. Manganezin etkisi, yeniden kristalleşme sıcaklığını arttırmak ve ısıtılarda üzerine lifli yapı oluşumunu teşvik etmektir. Dağınık bir çökelti olarak toparlanmayı yavaşlatmada ve tane büyümesini önlemede etkilidir. Manganez çökeltisi, ısıtılarda uygulanabilen alaşımların söndürme hassasiyetini artırır (ASM, 1992).

Silisyum: Demirden sonra, elektrolitik ticari alüminyumdaki en yüksek safsızlık seviye sahip olan elementtir (% 0.01 ile % 0.15). Dövme alaşımlarda Silisyum, 6XXX serisi ısıtma işlemi uygulanabilen alaşımlarda Mg_2Si üretmek için % 1,5'e varan seviyelerde magnezyum ile birlikte kullanılır. Yüksek saflıkta alüminyum-silisyum alaşımları % 3 Si'ye kadar bulunur, en kritik aralık % 0,17 ile 0,8 Si'dir, ancak silisyum ilaveleri (% 0,5 ile % 4,0) alüminyum-bakır-magnezyum alaşımlarının çatlama eğilimini azaltır. Herhangi bir silisyum içeren alaşıma eklenen küçük miktarlarda magnezyum onu ısıtma işlemi görebilir hale getirecektir, ancak bunun tersi doğru değildir çünkü Mg_2Si oluşturmak için gerekenden fazla magnezyum bu bileşiğin katı çözünürlüğünü keskin bir şekilde azaltır. Silisyum modifikasyonu, ötektik ve hipoötektik alaşımlarda sodyum ilavesiyle ve hiperötektik alaşımlarda fosforla gerçekleştirilebilir. Sert lehim levhası için kaplama olarak kullanılan işlenmiş alaşımlara % 12'ye kadar Si eklenir. Yaklaşık % 5 Si içeren alaşımlar anodize edildiklerinde siyah bir renk alırlar ve süs amaçlı kullanılırlar (ASM, 1992).

Titanyum: Ticari saflıkta alüminyumda 10 ile 100 ppm Ti miktarları bulunur. Titanyum, alüminyumun elektriksel iletkenliğini azaltır, ancak seviyesi çözünmez TiB_2 oluşturmak için eriyiğe bor ilavesiyle azaltılabilir. Titanyum, öncelikle alüminyum alaşımlı döküm ve külçelerde tane inceltici olarak kullanılır. Tek başına kullanıldığında titanyumun etkisi, erimiş halde tutma süresi ve tekrar eritme ile azalır. Tane inceltme etkisi, eriyikte bor varsa veya büyük ölçüde TiB_2 olarak birleştirilmiş bor içeren bir ana alaşım olarak eklenirse artar. Titanyum, kaynak dolgu teline yaygın bir ektir; kaynak yapısını düzeltir ve kaynak çatlamasını önler. Dökme tanecik yapısını iyileştirmek ve çatlamayı önlemek için genellikle tek başına veya TiB_2 ile birlikte levha veya ekstrüzyon külçelerinin dökümü sırasında eklenir (ASM, 1992).

Vanadyum: Ticari sınıf alüminyumda genellikle 10 ile 200 ppm V vardır ve iletkenliği düşürdüğü için genellikle borlu elektrik iletken alaşımlarından çökeltilir. Denge diyagramının alüminyum ucu peritektiktir ve bu nedenle metaller arası VA_{11} 'in katılma üzerine bir tane inceltici etkiye sahip olması beklenir, ancak titanyum ve zirkonyumdan daha az etkilidir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı vanadyum ile yükseltilir (ASM, 1992).

Zirkonyum: Geri kazanımı ve yeniden kristalleşmeyi engelleyen ince bir metaller arası parçacıklar çökeltisi oluşturmak için % 0.1 ile 0.3 aralığındaki zirkonyum ilaveleri kullanılır. Özellikle alüminyum-çinko-magnezyum bileşiminde, yeniden kristalleşme sıcaklığını arttırmak ve işlenmiş ürünlerde tane yapısını kontrol etmek için zirkonyum ilavelerini kullanır. Zirkonyum ilaveleri, bu alaşım ailesini benzer krom ilavelerinden daha az su verme hassasiyeti bırakır. Yüksek sıcaklıkta şekillendirme sırasında gerekli ince alt yapıyı korumak için bazı süperplastik alaşımlarda daha yüksek seviyelerde zirkonyum kullanılır. Zirkonyum ilaveleri, döküm halindeki tanecik boyutunu azaltmak için kullanılmıştır, ancak etkisi titanyumunkinden daha azdır. Ek olarak, zirkonyum, titanyum artı bor ilavelerinin tane inceltici etkisini azaltma eğilimindedir, bu nedenle zirkonyum içeren alaşımları tanecik inceltmek için daha fazla titanyum ve bor kullanılması gerekir (ASM, 1992).

2.2. Plastik Şekil Verme Yöntemleri

Plastik şekillendirme prosesleri genel olarak sıcak ve soğuk deformasyona ayrılabilir altında ise haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme gibi belirli bireysel prosesler sıralanabilir. Bu metal işleme proseslerinin farklı amaçları olabilir; örneğin, bir döküm yapının sıcak haddeleme ile parçalanması veya bir bileşenin gerilerek biçimlendirilmesi.

Sıcak deformasyon sırasında veya sonraki soğutma sırasında metal yeniden kristalleşebilir ve mikro yapısal ölçekte neredeyse dislokasyonsuz bir malzeme bırakabilir. Bununla birlikte, işlenmiş metal veya alaşım daha tipik olarak, stres, gerilme, gerilme hızı ve sıcaklık gibi işlem parametrelerinin karakteristiği olan kristalitleri ve dislokasyon yapılarını içerir (Hansen ve Barlow, 2014).

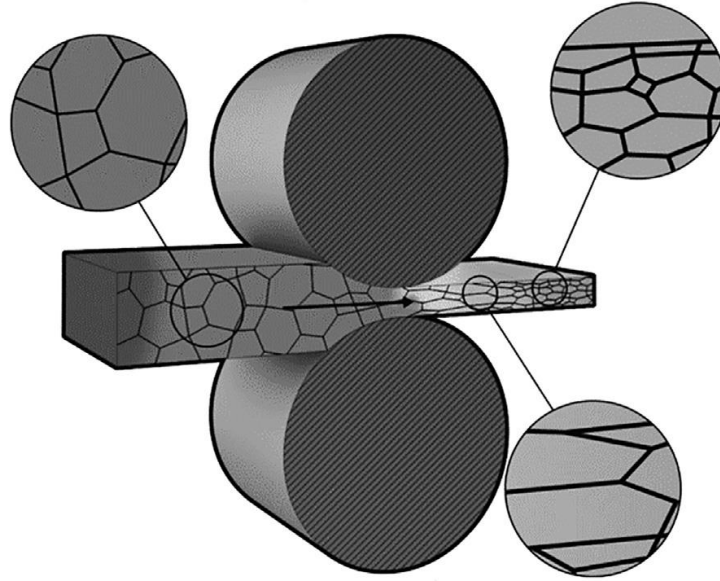
Tablo 2.5. Metal deformasyon yöntemleri ve etkileri (Hansen ve Barlow, 2014).

İşlem türü	Makro ve mikro seviyede etkileri
Birinci aşama şekillendirme süreçleri: sıcak deformasyon: Dövme; haddeleme; ekstrüzyon	<ul style="list-style-type: none"> - Büyük ölçekli şekil değişikliği sağlar - Gözenekliliği giderir - Dinamik yeniden kristalleşme - Kimyasal olarak homojen malzeme vermek için çözelti haline getirir - İkinci faz parçacıklarını çalışma yönüne paralel olarak dağılımı sağlar -Gerekli tane boyutunda düzgün eş eksenli kristalit yapı oluşturur - Kristalografik tekstür oluşturur.
İkinci aşama şekillendirme süreçleri: soğuk deformasyon: Dövme; haddeleme; tel çekme; derin çekme, gerdirerek şekillendirme, bükme, kesme.	<ul style="list-style-type: none"> -Daha ince ölçekli şekil değişikliği - Sertleşme: Tekli dislokasyonlar, duvar dislokasyonları, ikizleme dahil olmak üzere deformasyon mikro yapılarının oluşumunu teşvik eder. - Genellikle gerilme yönüne paralel uzamış kristalit yapılar üretir. - Tekstür oluşturur.

2.2.1. Haddeleme

Haddeleme, metali farklı yönlerde (saat yönünde ve saat yönünün tersine) dönen iki merdaneden oluşan bir boşluktan geçirerek ince uzun bir tabaka haline getirmek için kullanılan bir işlemdir. İki silindir arasındaki boşluğun, oluşturulacak işlenen malzeme parçasının kalınlığından daha küçük olması beklenir. Metal parça silindirler arasına konulduğunda, silindirlerden onu ince ve uzun olacak şekilde bir sürtünme ve basma kuvveti görür. Parça, silindirler arasındaki boşlukta yolunu tamamladığında, uzunluğu ve genişliği artırılmış orijinal olandan daha az kalınlığa sahip olmalıdır.

Haddeleme işlemi, büyük dökme malzemeyi daha ayrıntılı parçalara ve büyük uzunluktaki enine kesit malzemelere şekillendirmek için özel bir metal şekillendirme biçimidir. Haddeleme işlemi, malzemenin homojenliğini ve deformasyon sürecinden kaynaklanan özellikteki değişikliği sağlamak için haddelenen iş bileşeni geometrisine uygun olmalıdır (Bhaduri, 2018; Ikumapayi ve ark., 2020).



Şekil 2.2. haddeleme işleminin şematik gösterimi (Ikumapayi ve ark., 2020).

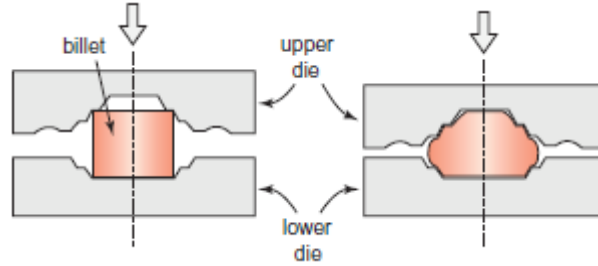
Haddeleme işleminde tane yapısı, farklı şekilde yönlendirilmiş ve tane sınırları ile çevrelenmiş taner düzenlenmesi olarak görülebilir. İşlem sıcaklığına göre haddeleme soğuk veya sıcak haddeleme olarak sınıflandırılır. İki işlemde sıcaklık etkisinden dolayı tane yapısı farklıdır. Kristaller yuvarlanma yönünde uzar. Soğuk haddelemede kristaller uzun şeklini korurken, sıcak haddeleme kristallerinde deformasyon bölgesinden geçtikten sonra yeniden biçimlenirler.

Sıcak haddeleme işlemi, dökümün tane yapısını dövülmüş tane yapısına değiştirir, döküm üniform olmayan bir tane yapısına sahip olur ve katılaşma yönüne uzanır. Sıcak haddelemede malzeme yüksek derecede plastik deformasyona uğrayabilir (Ikumapayi ve ark., 2020).

2.2.2. Dövme

Dövme, asırlık bir üretim prensibidir ve yüzyıllar boyunca yüksek derecede bir iyileştirmeye ulaşmıştır. Tipik olarak çelik somun anahtarları, bıçaklar ve benzeri ve çok sayıda otomobil bileşenine, özellikle de süspansiyon kolları gibi çok yüksek kuvvetlere dayanması gereken metal ürünler üretmek için kullanılır.

Dövme, bir levha, çubuk veya yarı bitmiş katı malzeme bloğunu alır ve birkaç darbeye (genellikle birden fazla) istenen şekle dönüştürme işlemidir. Dökümlerle karşılaştırıldığında, dövme daha az biçim özgürlüğü, ancak önemli ölçüde daha iyi malzeme özellikleri sunar.

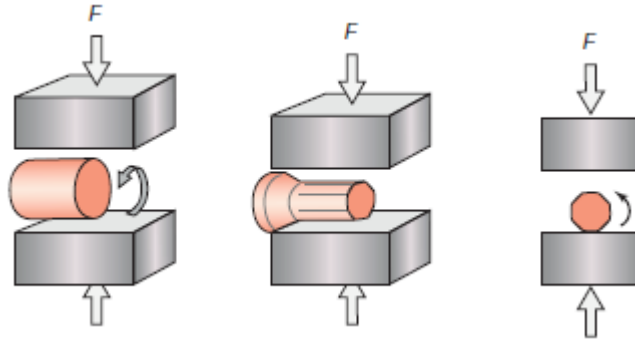


Şekil 2.3. Dövme işleminin şematik gösterimi (Tempelman ve ark., 2014).

Dövme bugün önemli sayıda yöntem kullanılarak yapılmaktadır. Tasarımcılar için, üzerinde çalışılacak üç ana yöntem ise, açık kalıpta dövme, kapalı kalıp dövme ve pres dövme.

- Açık kalıpta dövme yönteminde, sabit bir ritimde ve sabit bir kuvvetle yukarı ve aşağı hareket eden iki kalıp arasında bir metal blok veya çubuk (elle veya robotlarla) manipüle edilir. Bu yöntemin, büyük bir silindirin çapını kademeli olarak azaltmak için uygulanır. Kalıpları ise genellikle düzdür; bazen iş parçasının bölümlerini kesmek için basit şekillere (örneğin, V şeklinde) sahip olurlar. Açık kalıp dövme, düşük hızı nedeniyle büyük üretim hacimleri için uygun değildir, ancak küçük serilere ve hatta prototiplemeye çok uygundur.
- Kapalı kalıpta dövme; sıradan toleranslara sahip oldukça karmaşık bir parçanın çok sayıda dövülmesi gerekiyorsa, bu yöntemi tercih edilir. Genellikle kısa bir adım dizisi halinde parçalar oluşturur; 1. adımda ön şekillendirme, 2. adımda gerçek parça oluşturma ve 3. adımda flaş sökme gösterilmektedir. Her adım için bir tane olmak üzere birden fazla kalıp gerektiğinden dolayı maliyeti yüksektir, ancak biçim çeşitliği iyidir ve küçük parçalar için üretim hızı sadece saniyeler olabilir (Tempelman ve ark., 2014; Bhaduri, 2018).
- Pres dövme; yönteminde, iş parçası, kuvvet ve yer değiştirme üzerinde hassas kontrol ile hidrolik kullanılarak düşük hızda bir araya getirilen parçaya özgü

iki kalıp arasında oluşturulur. Kapalı kalıpta dövme yöntemi gibi, flaş üretir. Pres dövme, mikroyapıyı ve nihai özellikleri de etkileyen gerinim hızı üzerinde bir miktar kontrol sağladığından üstün kalite sunabilir. Kalıp teması saniyeler sürdüğü için ısıtılamaz ama işlemin yarısında iş parçasını yeniden ısıtmanın gerekli olabilir. Bu açıdan bakıldığında yine çoğu yağlama maddesinin izolatör görevi görmesi ve kalıp ile iş parçası arasındaki ısı transferini sınırlaması faydalıdır.

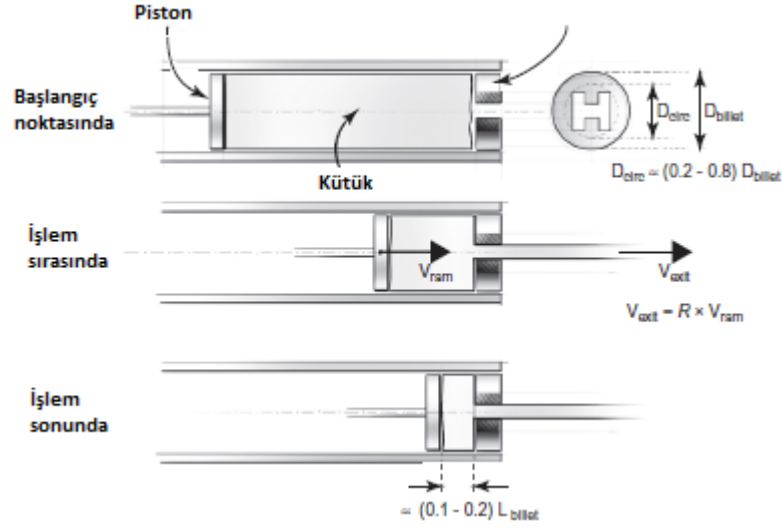


Şekil 2.4. Açık kalıpta dövme işleminin adımların dizilişi (Tempelman ve ark., 2014).

2.2.3. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, her türlü metal profili yapmak için idealdir. Ekstrüde edilen metalin sertliğine bağlı olarak, profil enine kesiti çok çeşitli şekillere sahip olabilir ve katı veya içi boş olabilir, genellikle birden fazla dahili "bölme" içerir. Geometrik toleranslar üzerinde nispeten sıkı kontrolle birlikte bu büyük form özgürlüğü, flanşlar, menteşeler veya vida delikleri gibi çeşitli işlevleri profile entegre etmemize olanak tanır. Ek olarak, ekstrüzyon endüstrisi, ekstrüde edilmiş profillerin kolaylıkla bükülmesine, işlenmesine ve bitirilmesine izin vererek, profili montaja hazır bir parçaya dönüştüren kapsamlı bir ikincil işlemler dizisi sunar. Bütün bu avantajların sürecin popüleritesini açıklar, ancak bu faydaların çoğunun yalnızca alüminyum için geçerli olduğu da eklenmelidir. Bakır, pirinç veya düşük karbonlu çelik için yöntem kullanılması önemli ölçüde sınırlıdır. Diğer daha sert metallerin ise ekstrüzyonu daha nadirdir ve temel profil şekilleriyle sınırlıdır. Magnezyum, nispeten yumuşak olmasına rağmen, ekstrüde edilebilir, ancak alüminyumdan daha fazla sınırlaması vardır. Sonuç olarak,

tüm metal ekstrüzyonun yaklaşık % 90'ı alüminyum ile yapılır ve bunun çoğu yalnızca bir alaşım grubundan gelir: "6000 serisi".



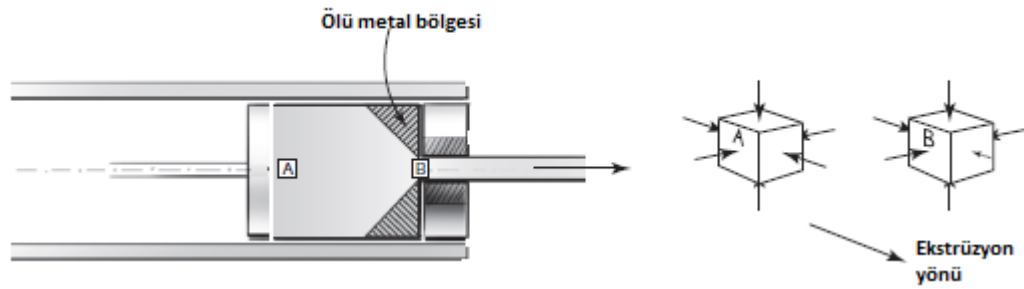
Şekil 2.5. Ekstrüzyon prensibinin temsili (Tempelman ve ark., 2014).

Prosesin başlangıcında pres kabının içine önceden ısıtılmış bir "kütük" yerleştirilir ve daha sonra bir pres kütüğü tarafından ekstrüzyon kalıbı içinden preslenir ve istenen profil çıkar. Kütükler, dökümlü yapılan silindirik metal çubuklardır ve tipik olarak yaklaşık 1 m uzunluğundadır. Kütük ile profilin en/ kesit alanları arasındaki orana (ekstrüzyon oranı R) bağlı olarak daha uzun profiller yapmak mümkündür. Ekstrüzyondan hemen sonra profiller gerilerek düzleştirilir ve boyuna kesilir. Bu yöntemde, metalin erime sıcaklığına yakın ancak altındaki yüksek sıcaklıklarda yapılır (Bhaduri, 2018; Tempelman ve ark., 2014).

Gerilme durumuna daha yakından bakarsak, ilk önce neredeyse tüm kütüğün ekstrüzyon sırasında hidrostatik basınç altında olduğunu fark ederiz: metal her taraftan kapatılırken sıkıştırılır ve sonuç olarak üç ana yönde de bir sıkıştırma gerilimi oluşur. Piston metal üzerine uyguladığı basınç (N/m^2 cinsinden) zamanla metaldeki tüm yönlerdeki gerilim seviyesine eşit olur.

Böyle bir üç eksenli gerilme durumunda, metaller tek eksenli bir gerilme durumunda olduğundan daha yüksek gerilmelere dayanabilir. Kalıp çıkışında, gerilme durumu

farklıdır; metal bir tarafta desteklenmez (yani profil şekli) ve diğerlerinin tamamı kapalıdır. Bu durumda hidrostatik basınç altında olduğundan daha zayıftır. Sonuç olarak, ekstrüzyon sırasında kütüğün deformasyonu kesik koni şeklinde bir hacimde yoğunlaşır ve kalıp çıkışı koni ucunu oluşturur. Bu aynı zamanda malzemenin hiç deforme olmayan bir kısmı olduğu anlamına gelir: "ölü metal bölge". Bu bölge, % 10 ile % 20 üretim hurdasının çoğunu oluşturur (Tempelman ve ark., 2014; Bhaduri, 2018).



Şekil 2.6. Ölü metal bölge ile ekstrüzyon detayı (Tempelman ve ark., 2014).

Tablo 2.6. Çeşitli ekstrüzyon alaşımlarının ekstrüzyonu için örnek veriler (Tempelman ve ark., 2014).

	Kütük sıcaklığı (°C)	Erime sıcaklığı (°C)	Çıkış hızı (m/dak)	Örnek alaşımlar
"Kolay" alüminyum alaşımları	460-480	610-655	35-80	AW-6060*
"Orta derecede zor" alüminyum alaşımları	450-500	575-650	5-30	AW-6082
"zor" alüminyum alaşımları	420-430	475-635	0,8-2	AW-7075
Bakır	780-950	1080	~ 300	
Pirinç	550-875	952-967	60-360	CuZnAL
Magnezyum alaşımları	250-440	450-620	0,3-30	
*AW, "işlenmiş alüminyum" anlamına gelir (yani, sac metal şekillendirme, dövme, ekstrüzyon ve benzerleri için alaşımlar)				

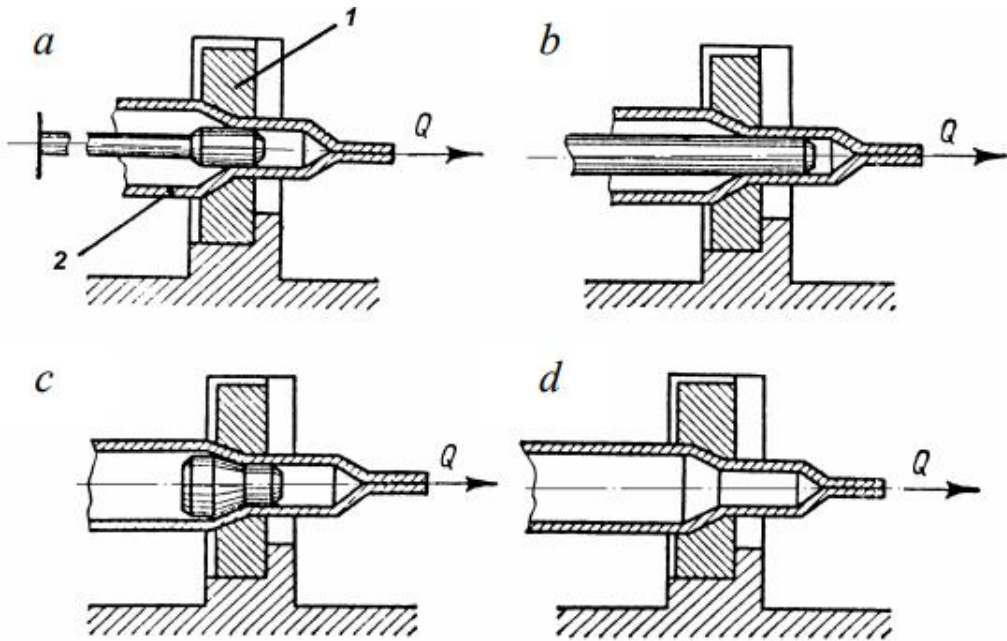
2.2.4. Çekme

Çekme genellikle, düz bir şerit, yuvarlak çubuk veya borunun enine kesit alanındaki şekil değişikliğini veya azaltmayı içeren, çıkış ucuna uygulanan bir çekme kuvveti ile bir kalıptan çekilerek yapılan bir soğuk işleme işlemidir. Çekme kuvveti uygulaması

altında malzemenin kalıpla reaksiyonu, plastik deformasyonun çoğuna neden olan iki karşılıklı dikey basma kuvveti geliştirir. Çekme genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir, ancak işlem sırasında, yer alan büyük deformasyonlardan üretilen ısı nedeniyle sıcaklık önemli ölçüde artmaktadır (Bhaduri, 2018).

Çekme genellikle bir bitirme işlemidir ve çekilen ürünler, direkt kullanılabilir ya da istenen boyut ve / veya şekli elde etmek için işleme ya da bükme gibi başka ek işlemlere tabi tutulur. Ürünün istenilen şekil ve boyutunun elde edilmesinin yanı sıra soğuk çekme işleminin temel amaçları şunlardır:

- Daha yakın boyutsal toleranslar elde etmek
- Yüzey kaplamalarını iyileştirmek
- Gerilme sertleşmesi ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi; çekme genellikle metalin mukavemetini ve sertliğini artırır.



Şekil 2.7. Tüp çekme yöntemleri: (a) – plug üzerinde; (b) - mandrel üzerinde; (c) - hareketli mandrel üzerinde; d – dönen kalıp ile çekme; 1 - kalıp; 2 - tüp; Q - çizim çekme (Danchenko, 2007).

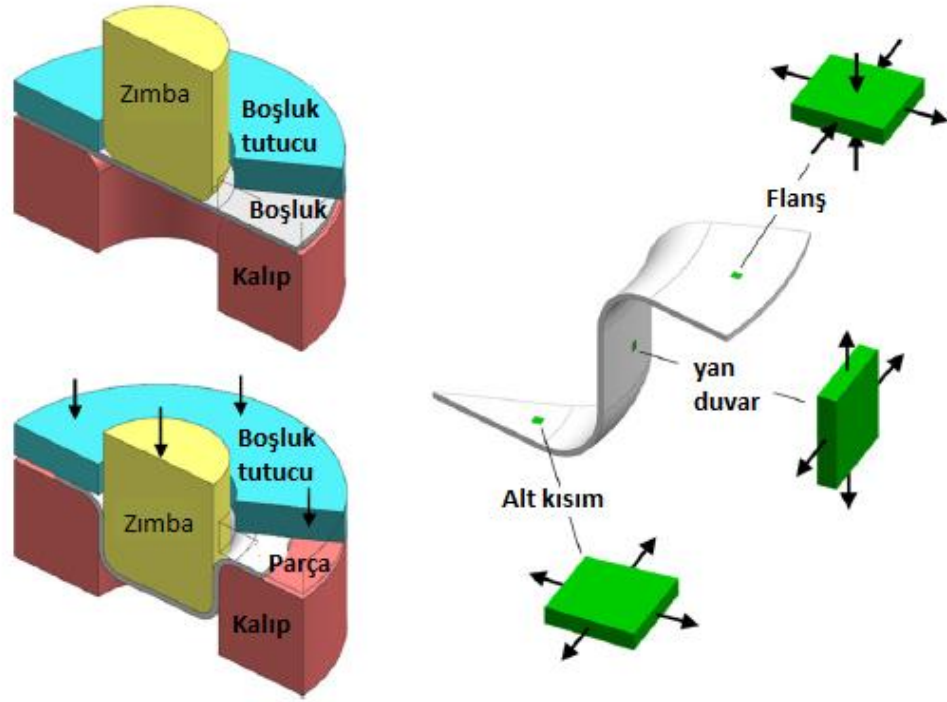
Şekil 2.7. çubuğa sabitlenmiş düz tapa üzerine çekme yapmak en yaygın yöntemdir. Boru çapının ve et kalınlığının aynı anda azaltılması gerektiğinde 8-10 mm'den büyük çaplı boruların çekilmesi için kullanılır. Şekil 2.7. bu yöntem, çapı 3 mm'den küçük

borular ve 1,0 mm'den küçük, et kalınlığı 0,2 ile 0,015 mm arasında olan paslanmaz çelikten kılcal boruların üretiminde kullanılan tek yöntemdir. Şekil 2.7. mandrel in şekli, çekme işlemi sırasında mandreli etkileyen kuvvetlerin onu deformasyon bölgesine çekmesi gerektiği gibi seçilir. Bu nedenle, mandreli çubuğa sabitlemek gerekli değildir. Şekil 2.7. döner kalıp ile çekme yöntemi, haddehanelerde soğuk haddeleme veya mandrel çekme işleminden sonra nihai işlem olarak kullanılır. Bu yöntemle gerdirme 1.5'i geçmez ve dışarı çıkan borunun mukavemeti ve deformasyon bölgesindeki enine kesitin stabilitesi ile sınırlıdır (Danchenko, 2007; Bhaduri, 2018).

2.2.5. Derin çekme

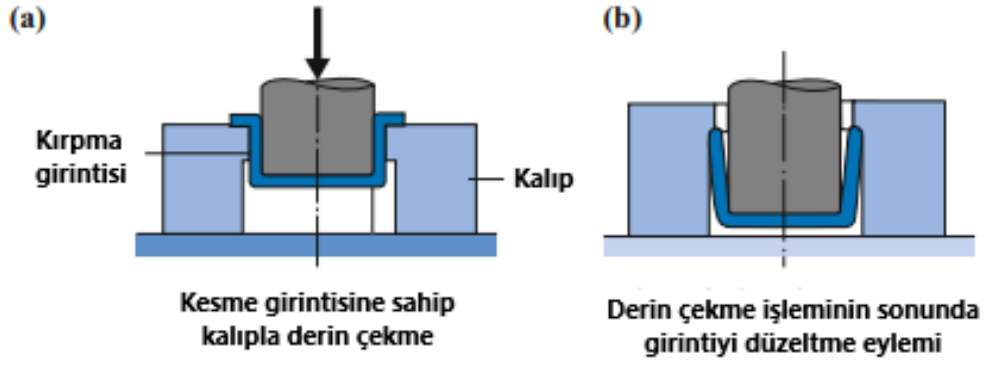
Derin çekme, düz bir boşluğun bir boşluk tutucu tarafından sınırlandırıldığı, levhanın orta kısmının, metali istenen şekle çekmek için bir zımba ile bir kalıp açıklığına itildiği bir sac şekillendirme işlemidir.

Şekil 2.8.'de silindirik bir kabın derin çekilmesindeki süreci ve deformasyonu şematik olarak göstermektedir. Çekme çanağının farklı deformasyon bölgelerinde farklı (ve karmaşık) deformasyon modlarına sahip olduğu görülebilir. İlgi alanları flanş, yan duvar ve deformasyonların derin çekme parçanın başarılı bir şekilde üretilip üretilmeyeceğini belirlediği tabandır (Shuhui, 2021).



Şekil 2.8. Ölü metal bölge ile ekstrüzyon detayı (Shuhui, 2021).

Derin çekme işlemiyle küvetler, pişirme kapları, içecek kutuları, lavabolar, basınçlı kaplar, otomobil gövde panelleri ve parçaları üretilebilir. Derin çekilebilen metaller arasında düz karbon çeliği, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımı ve titanyum bulunur. En basit şekliyle, derin çekme işlemi, genellikle soğuk bir çalışma sıcaklığında, uygun boyutta düz, ince, dairesel bir boş metal levha şekillendirilmiş bir kalıbın üzerine yerleştirilerek ve boşluğu bir zimba ile kalıba bastırarak gerçekleştirilir. Sıcak bir çalışma sıcaklığında derin çekme yapmaya yönelik herhangi bir girişim, çalışma malzemesinin daralmasına ve bozulmasına neden olabilir (Bhaduri, 2018; Shuhui, 2021).



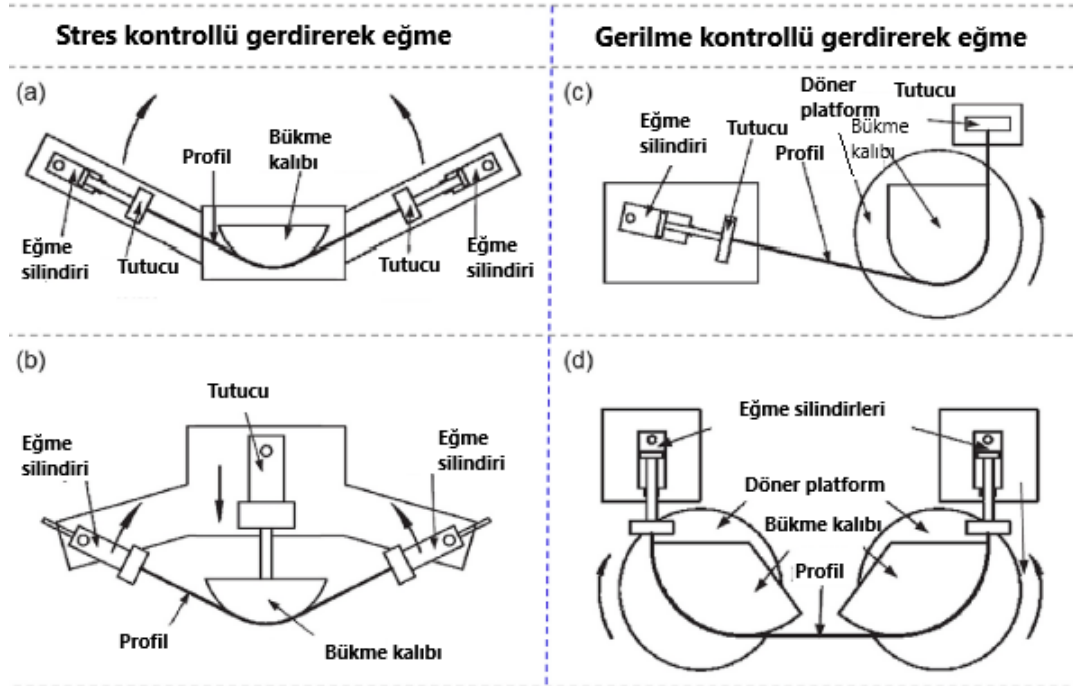
Şekil 2.9. Kırpma girintisi kullanılarak çekilen parçanın zımbadan sıyrılması (Bhaduri, 2018).

Çekme parçasının zımbadan sıyrılması, Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi çekme kalıbının alt tarafına küçük bir girinti işlenerek gerçekleştirilebilir. Zımbanın yukarı doğru vuruşu sırasında, çekilen kabın, zımba basıncından serbest bırakılır ve geri yaylanma eğilimi gösterir. Çekme işleminin sonunda, kesme girintisine sahip kalıp, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, çekilen parçanın yukarı doğru hareketi sırasında zımba ile birlikte hareket etmesini önler (Bhaduri, 2018; Shuhui, 2021).

2.2.6. Gerdirerek eğme

Gerdirerek eğme, yüksek boyutsal doğruluğu ve tekrarlanabilirliği nedeniyle bükülmüş şekillerin yüksek hacimli üretimi için yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Kinematik perspektifinden, eğme işlemi iki kategoriye ayrılabilir;

- Stres (veya kuvvet) kontrollü süreçler; genellikle simetrik parçalar oluşturmak için kullanılır. Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi açık kol ve döndürme kolu tipi işlemleri içerir.
- Gerilme kontrollü süreçler; genellikle daha karmaşık şekiller oluşturmak için yaygın olarak kullanılan işlemdir. Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi tek dönüş ve çift dönüş tipi hareketleri içerir (Ma ve Welo, 2021).



Şekil 2.10. Gererek eğme yöntemlerinin işlem ilkelerinin şematik görünümü: (a) açık kol tipi; (b) rotasyon kolu tipi; (c) tek yönden döner tipi; (d) çift yönden döner tipi (Ma ve Welo, 2021).

Gererek bükmenin zorluk yanı, düşük esneklik, takım, makine ve pres maliyeti yüksek olmasıdır. Çoğu durumda, bir araç seti yalnızca tek bir ürün yapılandırmasını destekleyebilir ve bu da günümüzün toplu özelleştirme talebini düşük maliyetle karşılamayı zorlaştırır (Ma ve Welo, 2021).

2.3. Yeniden Kristallenme Süreci

Metalik malzemeler, ara veya nihai ürüne dönüşmesi için soğuk veya sıcak ortamda bir plastik şekil verme yönteminden geçmeleri gerek. Bu işlemlerin aynı zamanda birer termomekanik proseslerdir ve temel unsurları ise; yeniden kristallenme, toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesidir. Deformasyona uğramış tanelerin tamamının, yeni çekirdeklenen ve büyüyen tanelere dönüşmesi tekstürü belirler yani metallerin mekanik özelliklerini belirlemede etki eden bir faktör olduğunu söylenebilir.

Yapıya duyarlı özelliklerdeki en önemli değişiklikler, birincil yeniden kristallenme aşamasında meydana gelir. Bu aşamada, deforme olmuş kafes, oluşan çekirdeklerden

gerilmesiz tanelerin büyüdüğü bir çekirdeklenme ve büyüme süreci vasıtasıyla tamamen yeni bir kafes ile değiştirilir. Yeni taneciklerin yönelimi, tükettikleri kristallerden önemli ölçüde farklıdır, bu nedenle büyüme süreci tutarsız olarak değerlendirilmelidir, yani yeni kristalleri, gerilen matristen ayıran geniş açılı sınırların ilerlemesiyle gerçekleşir (Smallman ve Bishop, 1999; Kavaklioglu, 2013).

Yeniden kristallenmenin itici gücü, metalik malzemenin içinde depolanan enerji miktarıdır. Bu enerji, deformasyon işleminin sırasında malzemede oluşan kristalin kusurları ve latis gerilmelerinden kaynaklanır. Metalik bir malzemenin deformasyonu sırasında üretilen enerjinin büyük kısmı, malzemede depolanan enerjinin yalnızca küçük bir kısmı ile ısı olarak dağıtılır. Depolanan enerjinin en büyük kısmı ise kristal kusurlarından (dislokasyonlar ve nokta hataları) ve dislokasyonların ana kaynağı olduğunu söylenmektedir.

Deformasyon işlemi soğuk işlem olarak uyguladığında, malzemedeki dislokasyon yoğunluğunu, işlemden önce yaklaşık $10^{10-12} \text{ m}^{-2}$ 'den tahmini olarak 10^{16} m^{-2} 'ye yükselttiğini bilinmektedir. Her dislokasyonun bir kristal kusur olması nedeniyle, çevresi içinde kafes gerilmeleri üretir, bu şekilde depolanan enerjiye önemli katkıda buldukları açıklar. Artan kafes gerilmeleri, metaldeki gerilme enerjisindeki artışla ilişkilidir.

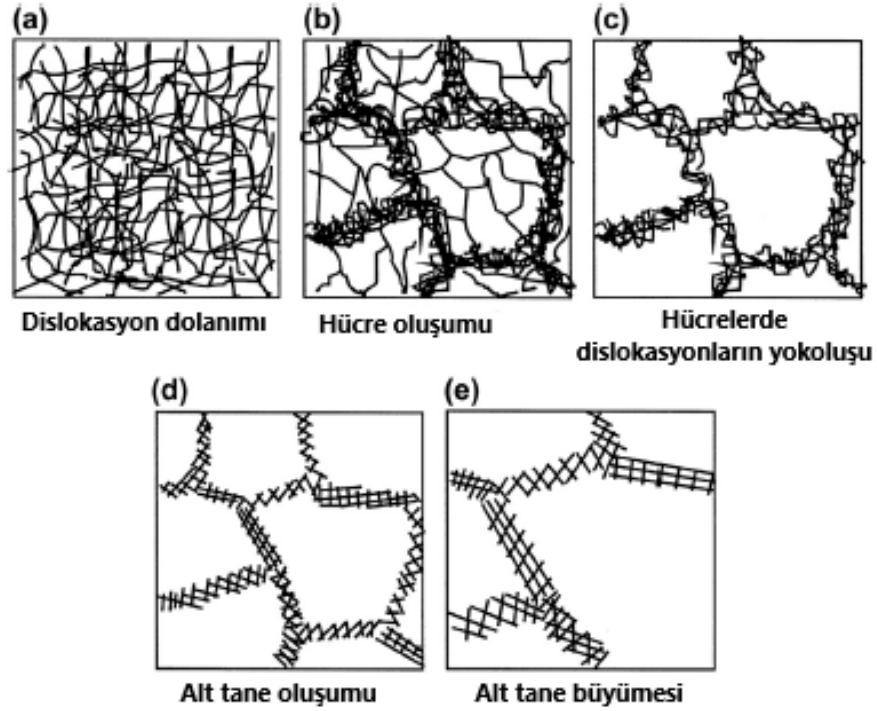
Sonuç olarak, deforme olmuş metal daha düşük bir serbest enerji durumuna, yani daha mükemmel bir duruma geri dönmeye çalışacaktır. Daha dengeli bir yapıya dönüş kendiliğinden gerçekleşemez, ancak difüzyon, çapraz kayma ve tırmanma gibi termal olarak aktive edilen işlemlerin gerçekleştiği yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Tüm denge dışı süreçler gibi, dengeye yaklaşma hızı, formun bir Arrhenius denklemi tarafından yönetilmektedir.

Soğuk işlenmiş koşulun kaldırılması, üç işlemin kombinasyonu ile gerçekleşir ve bunlar : (1) Toparlanma, (2) yeniden kristallenme ve (3) tane büyümesi (Smallman ve Bishop, 1999; Humphreys ve ark., 2017; Alaneme ve Okotete, 2018).

2.3.1. Toparlanma

Toparlanma terimi, yeniden kristallenme safhasından önce meydana gelen ve deforme olmuş bir malzeme özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri deformasyondan önceki değerlerine kısmen geri kazandıran süreci ifade eder.

Düzene giren dislokasyonların daha düşük enerjiye sahip oldukları durumuna poligonizasyon olarak adlandırılır. Poligonizasyon meydana geldiğinde, dislokasyonların tarafından küçük açılı sınırlar meydana getirilir. Dolayısıyla yapıya alt taneler ortaya çıkar. Böylece, toparlanmanın esas olarak malzemenin dislokasyon yapısındaki değişikliklerden kaynaklandığı için bu süreci tartışırken mikroyapısal yönlere odaklanması daha uygun ve sağlıklı olduğu söylenebilir (Smallman ve Bishop, 1999; Humphreys ve ark., 2017; Alaneme ve Okotete, 2018).



Şekil 2.11. Plastik deforme olmuş bir malzemenin toparlanma safhasında çeşitli aşamalar (Humphreys ve ark., 2017).

Dislokasyon tek bir mikroyapısal değişiklik değil, Şekil 2.11.'de şematik olarak gösterilen bir dizi olayın hadisedir ve numunenin tavlama sırasında bunların

herhangi birinin veya tamamının meydana gelip gelmediği, malzemenin saflığı, gerilme, gerilme hızı, deformasyon sıcaklığı ve tavlama sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır (Smallman ve Bishop, 1999; Humphreys ve ark., 2017).

2.3.2. Yeniden kristallenme

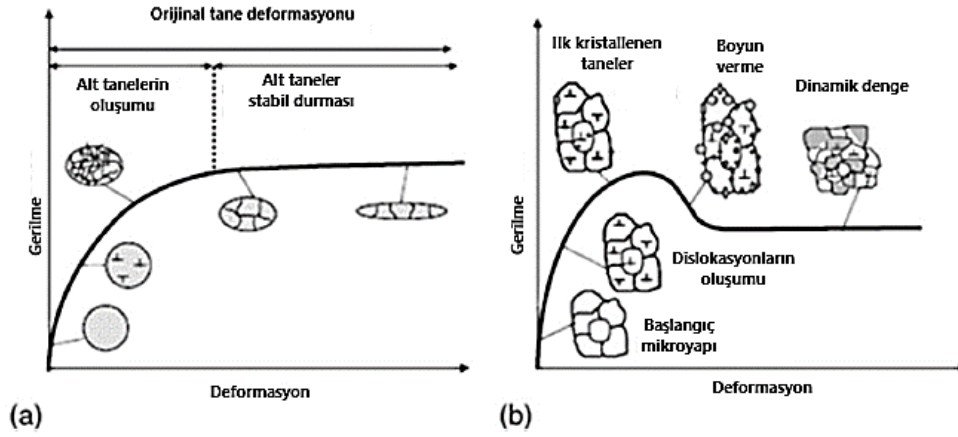
Yeniden kristallenme sürecinde malzemedeki tanelerin çekirdeklenmesi ve daha sonra büyümesi olayından ibarettir. İkincil, üçüncül yeniden kristalleşmeden veya anormal tane büyümesinden ayırmak için bu tür yeniden kristallenmeye genelde birincil yeniden kristalleşme denir. Yeniden kristallenme, toparlanma aşamasından sonra gerçekleşir ve toparlanma sırasında oluşan taneler kaybolup yeni taneler oluşmaya başlar. Yeni kristaller, tane sınırlarına yakın bölgeler, deformasyon izlerinin kayma düzlemlerinin kesişmesi gibi yüksek enerjili bölgelerde çekirdeklenir, yani yeniden kristallenmeyi sağlayacak enerji, malzemenin soğuk işlem gördüğünde depoladığı enerjidir.

Yeni kristallenme soğuk işlem görmüş bir katı malzemenin yeniden kristallenmiş katı malzemenin bir katı-katı şeklinde dönüşümdür. Bu safhanın sonucunda malzemenin soğuk işlem sürecinde kazandığı mekanik özelliklerini tamamen kaybediyor olacaktır. Yeniden kristallenme, iki kademedir oluşur; tanelerin çekirdeklenmesi ve tane büyümesidir, bu proseslerde bir izotermal tavlama sürecinde yavaş başlangıcı olur daha sonra maksimum reaksiyon hızına ulaşır ve sonunda yavaşça biter, dolayısıyla yeniden kristallenme kinetiği toparlanmadan tamamen farklıdır (Kavaklioglu, 2013; Humphreys ve ark., 2017; Alaneme ve Okotete, 2018).

Tablo 2.7. Yeniden kristallenme ile toparlanma arasındaki farklar (Kavaklioglu, 2013).

Toparlanma Süreci	Yeniden kristallenme Süreci
Özellikler kısmi yenilenir	Özelliklerde tamamen yenilenme
Mikroyapıda yeni dislokasyonlar	Mikroyapıda çok az dislokasyon
Deforme olmuş tanelerin tane yapısı önceki ile ilişkili	Yeni tanelerin oluşması
Deforme olmuş yapının mukavemetinde azalma	Yapı daha yumuşak

Toparlanma ve yeniden kristallenmenin aktive edilmiş olduğu durumlar için sıcak deforme olmuş metallerdeki mikro yapının gelişiminin şematini Şekil 2.12.'de gösterilmektedir



Şekil 2.12. Bir malzemenin sıcak deformasyonu sırasında mikroyapının gelişimi (a) dinamik toparlanma (b) dinamik yeniden kristallenme (Alaneme ve Okotete, 2018).

2.3.3. Yeniden kristallenmeye etkileyen faktörler

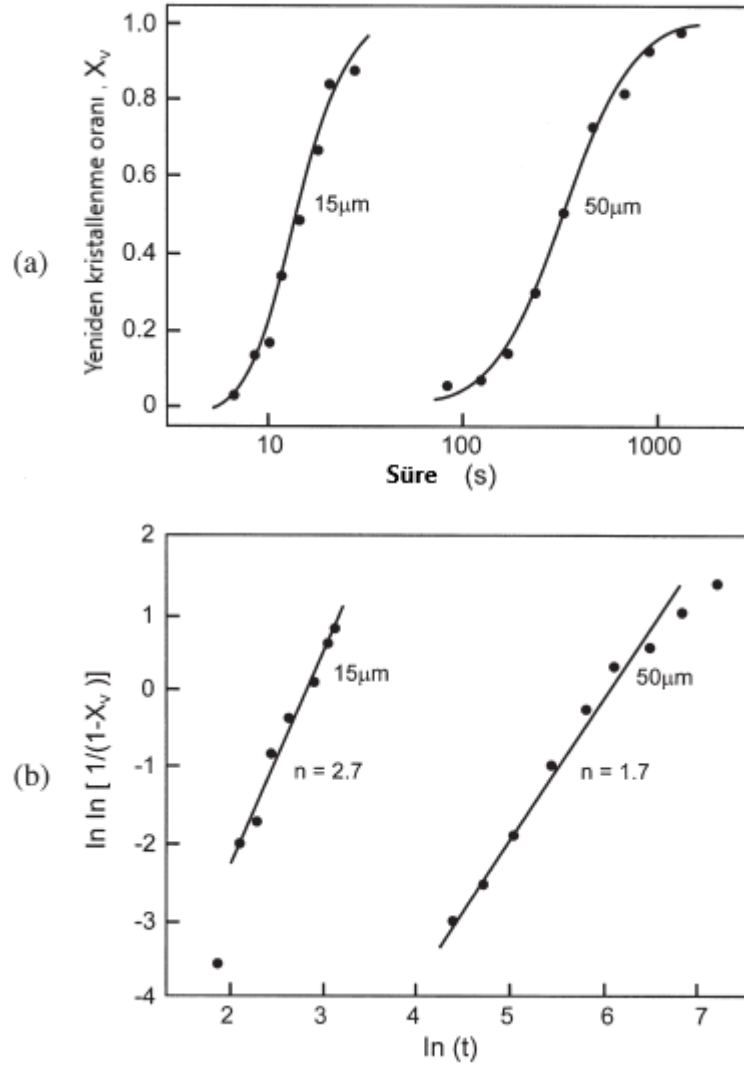
Yeniden kristallenme etkileyen faktörler Tablo 2.8.'de verildiği gibi proses ve metalurjik etkiler olarak ayrılabilir (Kavaklıoğlu, 2013).

Tablo 2.8. Yeniden kristallenmeye etkileyen faktörler (Kavaklıoğlu, 2013).

Prosesten kaynaklanan faktörler	Mikroyapıdan kaynaklanan faktörler
- Sıcaklık	- İlk tane boyutu
- Isınma hızı	- İkinci faz partiküllerinin boyutu, dağılımı ve uyumu
- Şekil değiştirme hızı	- Çözünen içerik (katı eriyik)
- Şekil değiştirme	- Deformasyondan önce ve sonra tekstür

2.3.3.1. Başlangıç tane boyutunun etkisi

Şekil 2.13.'de görüldüğü gibi tane boyutunun azalması durumunda, tane sınırı miktarını artar dolayısıyla tane sınırların bölgesinde, distorse olmuş kafes miktarı artar. Böylece ince taneli yapılarda, çekirdeklenme teşvik eden nokta sayısı daha fazla olmaktadır. Bu da ince taneli malzemelerin çekirdeklenme hızının artması ve yeniden kristallenmiş tanelerin boyutları küçük olmasını açıklar (Humphreys ve ark., 2017).



Şekil 2.13. %93 oranında soğuk haddelenmiş farklı başlangıç tane boyutlarına sahip bakırın 225 °C sıcaklıkta yeniden kristallenme kinetiği etkisi (Humphreys ve ark., 2017).

2.3.3.2. Safırlık etkisi

Yeniden kristalleşme hızın sade metallerde, empürite içeren metallerden daha yüksek olarak bilinir. Safsızlıklar, yeniden kristallenen tanelerin hem çekirdeklenmesini hem de büyümesini etkileyebilir. Yeniden kristallenme için bir çekirdeklenme oranını ve safsızlıkların etkisi ölçmek zordur ve bu safhada genel çalışmaların çözünen maddelerin ana etkisinin tane sınırı hareketliliği ve dolayısıyla yeniden kristallenen tanelerin büyüme hızı üzerinde olduğunu göstermektedir.

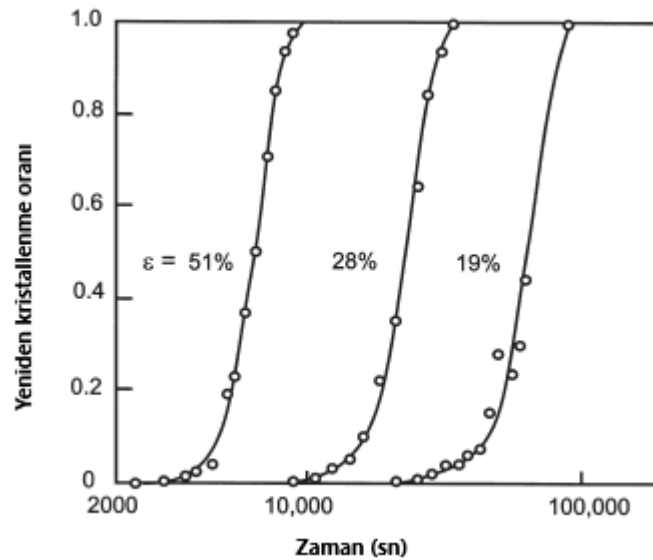
Tablo 2.9.'da, yüksek saflıktaki alüminyumda katı çözelti içindeki çok küçük demir konsantrasyonlarının yeniden kristallenme sıcaklığını ~ 100 °C artırabileceğini göstermektedir (Kavaklioglu, 2013; Humphreys ve ark., 2017).

Tablo 2.9. Yeniden kristallenme sıcaklığına saflığın etkisi (Humphreys ve ark., 2017).

Metal	Yeniden kristallenme sıcaklığı °C	
	Saflık	Rafine bölge
Alüminyum	200	-50
Bakır	180	80
Demir	480	300
Nikel	600	300
Zirkonyum	450	170

2.3.3.3. Deformasyon etkisi

Malzemeye uygulanan deformasyon miktarı arttığı sürece malzemenin içindeki enerji depolamaya teşvik eden kusurlu bölgeler çoğalır. Depolanan enerji artınca, çekirdekleşme olayı daha kolay hale gelir, dolayısıyla yeniden kristallenme için gerekli kuluçka süresi azalır. Şekil 2.14.'de görülmek üzere çekme gerilmesinin alüminyumun yeniden kristallenme kinetiği üzerindeki etkisi görülmektedir (Humphreys ve ark., 2017).



Şekil 2.14. 350°C'de tavlanmış alüminyumun yeniden kristallenme kinetiği (Humphreys ve ark., 2017).

2.3.3.4. Yeniden kristallenme kanunları

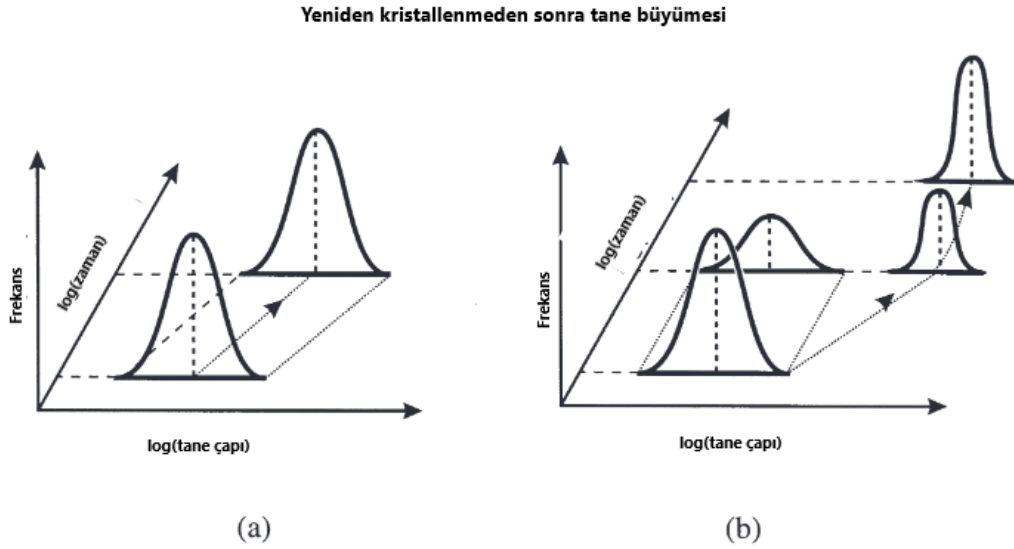
- Yeniden kristallenmeyi başlatmak için en az çekirdek oluşumunu ve büyüebilmesi için yeterli bir deformasyon miktarı uygulanması şarttır.
- Yeniden kristallenmenin gerçekleştiği sıcaklık, tavlama süresi ile ters orantılıdır, süre arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı düşer.
- Yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği sıcaklık, deformasyon arttıkça düşer.
- Yeniden kristalleşmenin teşvik eden depolanmış enerji, deformasyon ile artar. Bu nedenle çekirdeklenme ve ardından büyüme daha yüksek şekil değiştirmeye uğramış malzemelerde daha düşük sıcaklıklarda ve daha hızlı oluşur.
- Deformasyonun miktarı ne kadar yüksekse tane boyutu küçük olur. Deformasyonun yüksek olması, daha çok çekirdek oluşumunu teşvik eder dolayısıyla daha küçük tane boyutu sağlanacaktır.
- Saf malzemelerin alaşımlı malzemelere kıyasen daha kolay yeniden kristallenir.
- Başlangıç tane boyutu büyük olması çekirdeklenmeye teşvik eden bölgeler (tane sınır, dislokasyon gibi yüksek enerjili bölgeler) az olmak demektir. Dolayısıyla çekirdeklenme hızı düşer veya daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir.
- Yüksek deformasyon sıcaklıklarında, şekil verme esnasında dinamik toparlanma gerçekleşir ve depolanmış enerji daha düşük sıcaklıktaki deformasyona göre daha düşük olur (Humphreys ve ark., 2017).

2.3.4. Tane büyümesi

Birincil yeniden kristallenme ile karşılaştırıldığında, yeniden kristallenmiş tek fazlı bir malzemede tanelerin büyümesi nispeten daha basit bir süreç gibi görünebilir. Soğuk deformasyon işlemin depolanmış enerjisi yardımıyla birincil yeniden kristallenme tamamlandığında, yapı henüz kararlı hale gelmiş olmaz ve yeniden kristallenmiş taneciklerin daha fazla büyümesi meydana gelebilir. Bunun itici gücü, malzemedeki tane sınırları şeklinde depolanan enerjinin azalmasıdır. Tane büyümesi için itici

basınç, genellikle birincil yeniden kristallenmedekine göre iki kat daha azdır ve $\sim 10^2$ MPa'dır. Sonuç olarak, belirli bir sıcaklıkta, tane sınır hızları, birincil yeniden kristallenme sırasında olduğundan daha yavaş olacaktır ve sınır göçü, çözünen maddelerin etkilerinden daha fazla etkilenecektir.

Tane büyümesinin teknolojik önemi, malzemenin mekanik özelliklerinin davranışları tane boyutuna bağlı olmasıdır. Normalde daha düşük sıcaklıklarda yapısal uygulama için malzemelerde, mukavemeti ve tokluğu optimize etmek için küçük tane boyutu gerektirirken, bununla birlikte, bir malzemenin yüksek sıcaklıkta sürünme direncini iyileştirmek için, büyük bir tane boyutu gereklidir. Bu nedenle katı hal işleme sırasında metallerin mikro yapılarının ve özelliklerinin kontrolü için tane büyümesinin iyi anlaşılması önemli bir ön koşuldur.



Şekil 2.15. Tane büyümesinde, tane boyutu dağılımındaki değişikliğin şematik gösterimi (a) Normal tane büyümesi; (b) Anormal tane büyümesi (Humphreys ve ark., 2017).

Tane büyümesi iki türe ayrılabilir: normal tane büyümesi ve anormal tane büyümesi veya ikincil yeniden kristallenme. Mikroyapının homojen olarak kabalaştığı normal tane büyümesi, sürekli bir proses olarak sınıflandırılır. Şekil 2.15.'de gösterildiği gibi nispeten dar bir tane boyutu ve şekli aralığı vardır ve tane boyutu dağılımının şekli genellikle zamandan ve boyuttan bağımsızdır. Şekil 2.15.'de gösterildiği gibi sürekli olmayan bir proses olan, anormal tane büyümesi sırasında, mikro yapıdaki birkaç tane

büyür ve daha küçük tanelerin matrisini tüketir ve iki modlu bir tane boyut dağılımı gelişir. Bunun sonucunda, bu büyük taneler birbirine çarpışır ve normal tane büyümesi yeniden başlar (Kavaklioglu, 2013; Humphreys ve ark., 2017).

Tane büyümesini etkileyen ana faktörler şunlardır:

Sıcaklık: Tane büyümesi, yüksek açı sahip olan tane sınırlarının ilerlemesi ile bağlantılıdır, aynı zamanda tane sınırların hareketliliğinin sıcaklığa orantılı olduğundan dolayı tane büyümenin kinetiği da güçlü bir şekilde etkilenecektir. Tane büyümesi için itici güç genellikle çok küçük olduğundan, önemli tane büyümesi yalnızca çok yüksek sıcaklıklarda bulunur.

Çözünenler ve parçacıklar: Tane büyümesi birçok faktör tarafından engellenmesine rağmen, tane sınırlarının, çözünen maddeler ve ikinci faz partiküllerin tarafından sıkıştırılması çok etki eden bir faktördür.

Numune boyutu: Numunenin tabaka kalınlığından daha büyük olduğunda, tane büyüme hızı azalır. Bu durumda, sütun kıvamında taneler iki yön yerine sadece bir yönde kıvrılır ve bu nedenle itici güç azalır. Tane sınırların, yüzeyle kesiştikleri yerde, termal aşındırma ile oluklar oluşturabilir dolayısıyla daha fazla tane büyümesini engeller.

Tekstür: Güçlü tekstür sahip olan malzemeler yüksek bir seviyede düşük enerjili birçok düşük açılı tane sınır içerir ve bu da tane büyümesi için engelleyici bir faktördür (Humphreys ve ark., 2017).

BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

4,16 mm başlangıç kalınlığından soğuk haddelenmiş ve 2,99 ile 1,97 mm kalınlıklarına getirilmiş AA5005 alüminyum alaşım sacları, ASAŞ Alüminyum fabrikasından (Akyazı – Sakarya) temin edilmiştir. Bu saclar Şekil 3.1.'de verilmiştir. Bu sac numunelerinden metalografik inceleme için 1 cm x 1 cm ebatlarında numuneler kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AA5005 saclar

3.2. Yöntem

3.2.1. Deformasyon miktarı

Soğuk haddeleme sonrası saclarda oluşan deformasyon miktarı (ε) Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır. Bu denklemde t_0 başlangıç kalınlığı, t_s ise sacların haddeleme sonrası kalınlığıdır. Kademeli haddeleme olduğunda her bir kademenin deformasyon miktarı Denklem 3.2’de verildiği gibi toplanmaktadır.

$$\varepsilon = \ln \frac{t_0}{t_s} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n \quad (3.2)$$

Bu denkleme göre 2,99 mm kalınlığındaki deformasyon yüzdesi %33 ($\varepsilon = 0.33$) ve 1,97 mm kalınlığındaki saç için deformasyon yüzdesi %74,7 ($\varepsilon = 0,747$) olarak tespit edilmiştir.

3.2.2. Kinetik analiz

DSC (Diferansiyel Tarama Kalorimetri) alüminyum alaşımları gibi hafif metallerin incelenmesinde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Yeniden kristallenme, çökeltme ve homojenizasyon gibi katı halde gerçekleşen reaksiyonlar, ergitme ve katılaşma gibi faz dönüşüm reaksiyonlarının analizinde DSC ile yapılan termal analiz kullanılmaktadır. Ayrıca sözü edilen reaksiyonların kinetik incelemesinde de kullanılmaktadır (Starink, 2004).

Soğuk haddelenmiş AA5005 alaşımından alınmış saclarda yeniden kristalleşme kinetiği, izotermal olmayan yöntemle incelenmiştir. Bu amaçla farklı ısıtma hızlarında (10 – 15 – 20 – 25 °C/dak) numunelerin DSC analizleri yapılmıştır. Farklı ısıtma hızlarında alınan DSC grafiklerindeki yeniden kristallenme pik sıcaklıkları kullanılarak ve izotermal olmayan kinetik incelemelerde kullanılan Kissenger,

Boswell, Ozawa ve Starink denklemleri yardımıyla soğuk haddelenmiş AA5005 alaşımındaki yeniden kristallenme kinetiği incelenmiştir.

Kissenger denklemi (Kissenger, 1957);

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = k_1 - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.3)$$

Boswell denklemi (Boswell, 1980);

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p}\right) = k_2 - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.4)$$

Ozawa denklemi (Ozawa, 1992);

$$\ln(\beta) = k_3 - 1,051 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.5)$$

Starink denklemi (Starink, 2004);

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^{1.92}}\right) = -k_4 - 1,0008 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.6)$$

Bu denklemlerde;

T_p = pik sıcaklığı (K)

β = ısıtma hızı (K/dak)

E_a = aktivasyon enerjisi (kJ/mol)

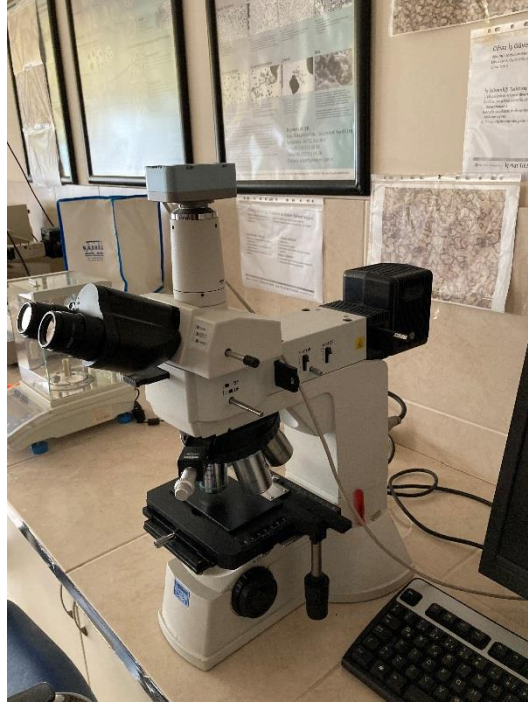
R = gaz sabiti (8,314 jul/mol.K)

k_1, k_2, k_3, k_4 = sabitler

Bu tez çalışmasında soğuk haddelenmiş AA5005 alaşımında yeniden kristallenme kinetiği, yukarıda zikredilen 4 farklı yöntem kullanılarak tespit edilmiştir.

3.3. Kullanılan Cihazlar

Metalografi işlemleri için ilk önce testere yardımıyla 3 farklı kalınlıktaki levhaların 1 cm x 1 cm ebatlarında numuneler kesilmiştir. Numuneler ince ve alüminyum alaşımlı olduğundan sıcak kalıplama işleminde incelenecek yapıya etki edeceği için bakalite alma işlemi tercih edilmemiştir. Daha sonra elde edilen kare şeklindeki 3 numune hadde yönüne dik olan yüzeyi inceleme için önce zımpara işlemine sokulmuştur. Zımpara için sırayla 800, 1200, 2500, 4000 zımpara kağıtları kullanarak RD Grinder-Polisher cihazı üzerinde zımparalanmıştır. Parlatma işlemi, alümina kullanarak yapılmış, daha sonra %3 nital dağlayıcı içerisinde dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.'de gösterilen Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskobu kullanarak metalografik görüntüler alınmıştır.



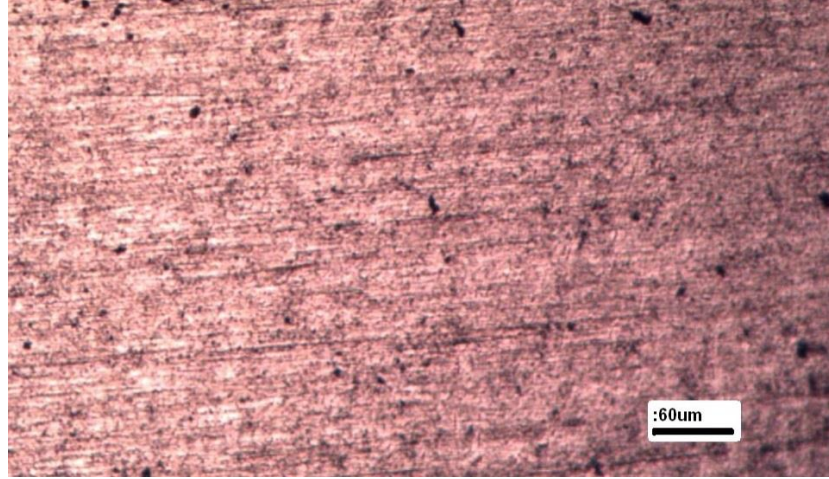
Şekil 3.2. Nikon ECLIPSE L150 optik mikroskop görüntüsü

Farklı deformasyon oranlarında soğuk haddelenmiş numunelerin termal analizleri, Bartın Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan TA Instruments SDTQ 600 cihazıyla, hava atmosferi koşulları altında 10, 15, 20 ve 25 °C/dak ısıtma hızlarında alınmıştır.

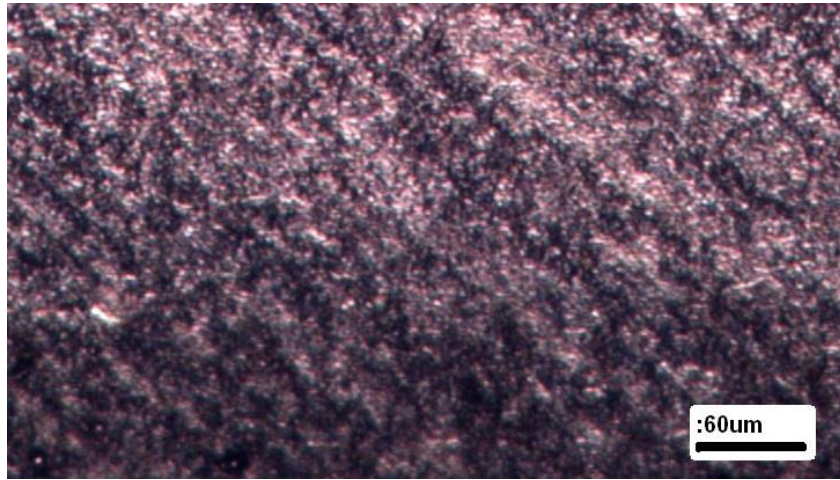
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Metalografik Çalışmalar

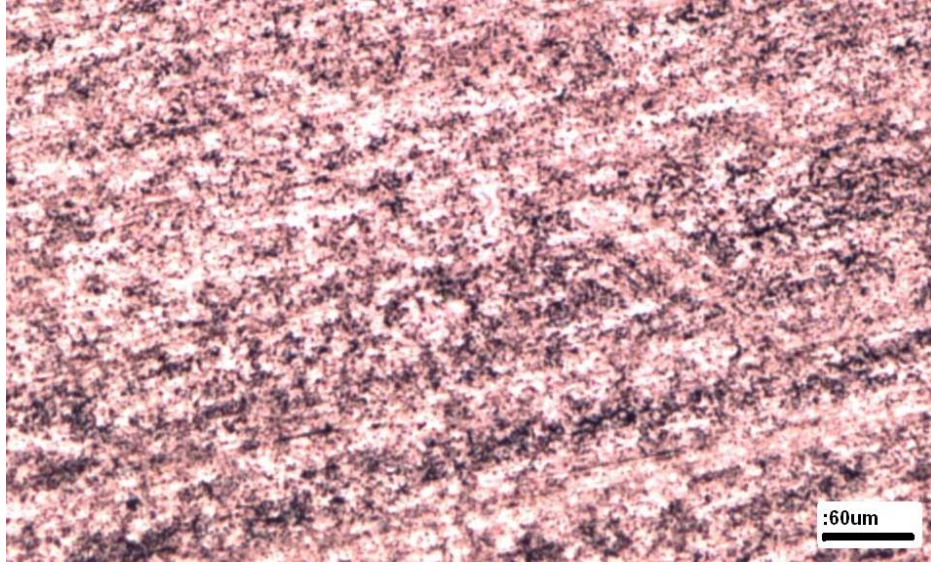
Deneysel çalışmalarda kullanılan ve farklı kalınlıklara sahip AA5005 sacların optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. 5x büyütme altında 4,16 mm kalınlıktaki numune metalografik görüntüsü



Şekil 4.2. 5x büyütme altında 2,99 mm kalınlıktaki numune metalografik görüntüsü



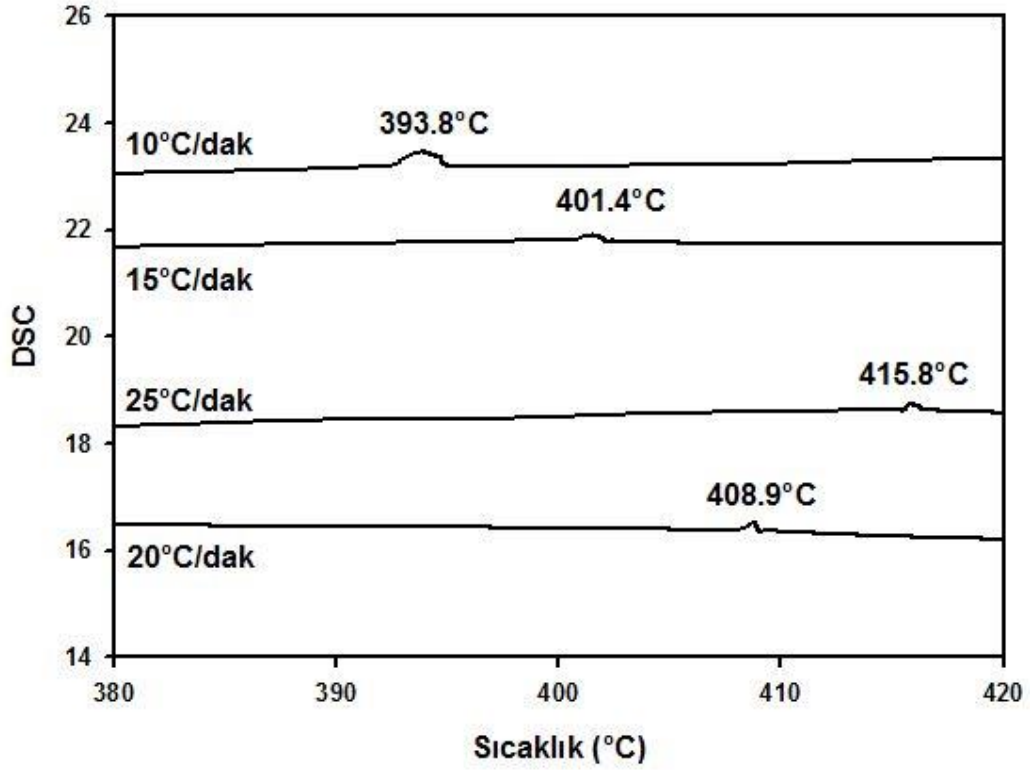
Şekil 4.3. 5x büyütme altında 1,97 mm kalınlıktaki numune metalografik görüntüsü

AA5005 alüminyum alaşımları ana elementi olan magnezyum içeriği endüstriyel ortamında % 5.5'i geçmez. Metalografik görüntülerinde görüldüğü gibi tercihen tane sınırlarında çökeler. Magnezyum, taneler arası çatlama ve gerilme korozyonuna duyarlılık kazandırırken, sünekliği gereksiz yere düşürmeden alüminyumun mukavemetini önemli ölçüde artırır.

4.2. Yeniden Kristallenme Kinetiği

Şekil 4.4.'de %33 deformasyona uğramış AA5005 sacların 380 – 420°C sıcaklık aralığındaki DSC analizleri verilmiştir. Farklı ısıtma hızlarında alınan DCS eğrilerinde yeniden kristallenme olayı çok küçük ekzotermik pikler olarak gözlenmiştir. Tespit edilen bu pik sıcaklıkları ile birlikte kinetik model verileri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Şekil 4.4.'den görüleceği üzere yeniden kristallenme pik sıcaklıkları 10 – 15 – 20 ve 25°C/dak ısıtma hızları için sırasıyla 393.8°C (666.8 K), 401.4°C (674.4 K), 408.9°C (681.9 K) ve 415.8°C (688.8 K) olarak tespit edilmiştir.

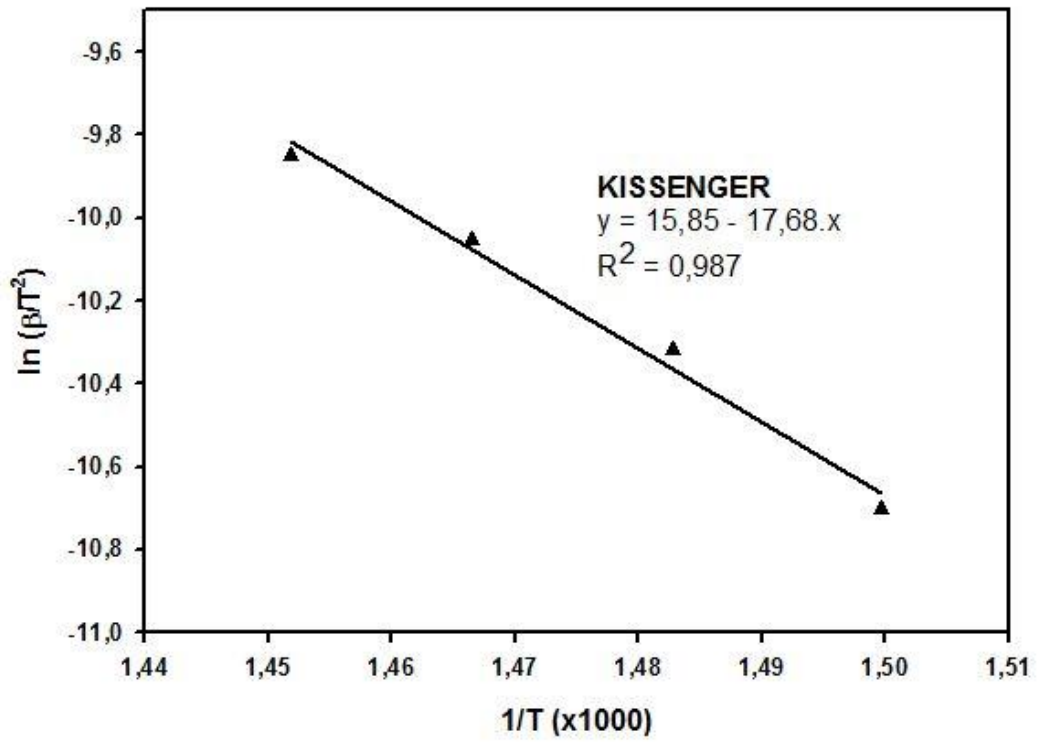


Şekil 4.4. $\epsilon=0,33$ olan AA5005 sacların DSC analizi

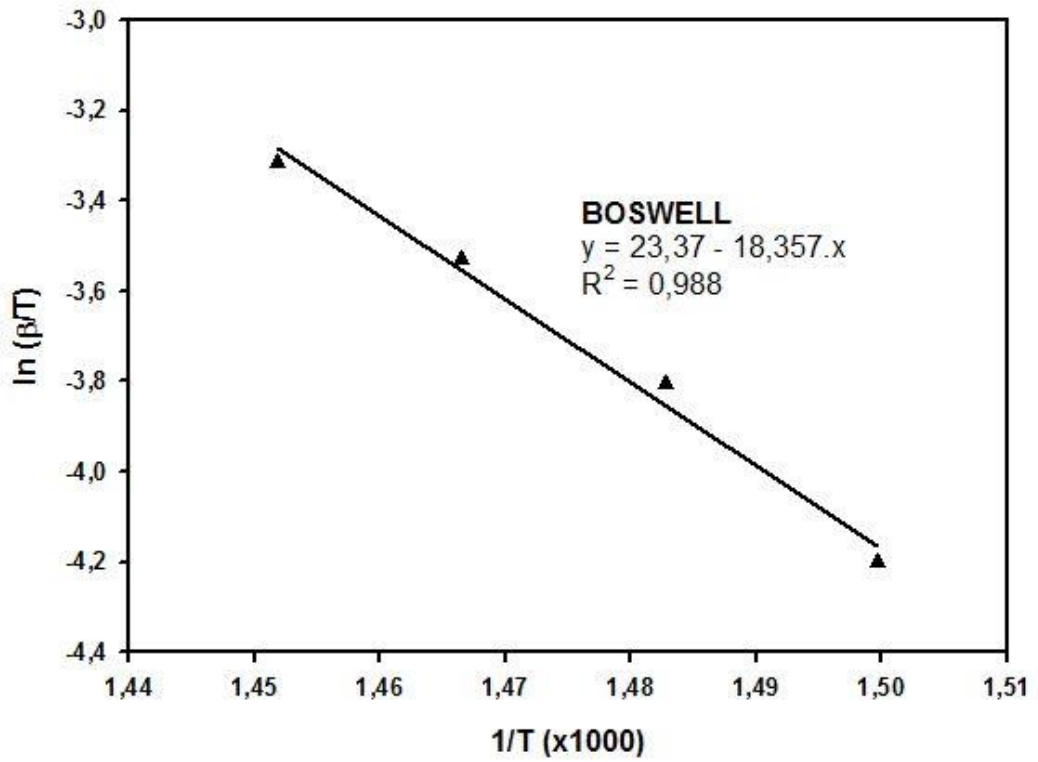
Tablo 4.1. $\epsilon=0.33$ olan AA5005 sacı için kinetik veriler

β	T (K)	1/T ($\times 10^3$)	Kissenger	Boswell	Ozawa	Starink
			$\ln(\beta/T^2)$	$\ln(\beta/T)$	$\ln(\beta)$	$\ln(\beta/T^{1.92})$
10	666,8	1,4997	-10,7024	-4,1999	2,3026	-10,1822
15	674,4	1,4828	-10,3196	-3,8058	2,7081	-9,7985
20	681,9	1,4665	-10,0540	-3,5292	2,9957	-9,5320
25	688,8	1,4518	-9,8510	-3,3161	3,2189	-9,3282

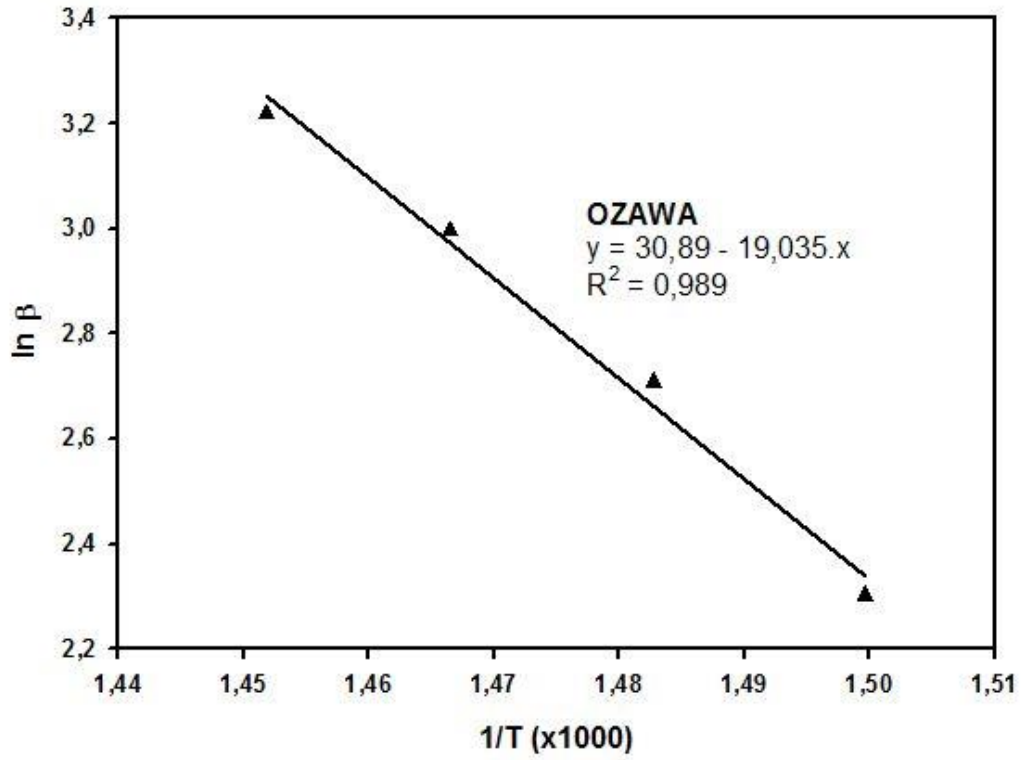
Tablo 4.1.'de ki veriler kullanılarak kinetik analiz yapmak için Şekil 4.5.'de Kissenger modeline göre $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği, Şekil 4.6.'da Boswell modeline göre $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği, Şekil 4.7.'de Ozawa modeline göre $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği ve Şekil 4.8.'de Starink modeline göre $\ln(\beta/T^{1.92}) - 1000/T$ grafiği verilmiştir. Bu 4 modelin birlikte gösterimi Şekil 4.9.'da verilmiştir. Bu grafiklerin eğimleri $-(E_a/R)$ değerine eşittir ve dört farklı modele göre bu eğimlerden yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri tespit edilebilir.



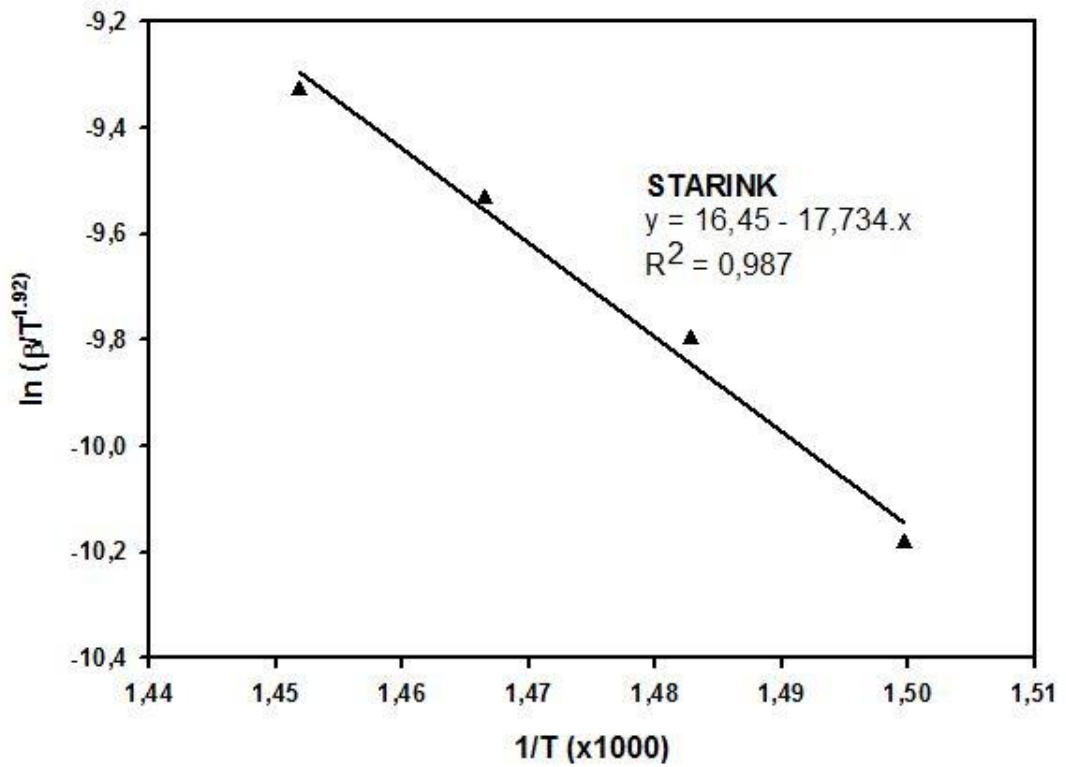
Şekil 4.5. $\epsilon=0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği (Kissenger modeli)



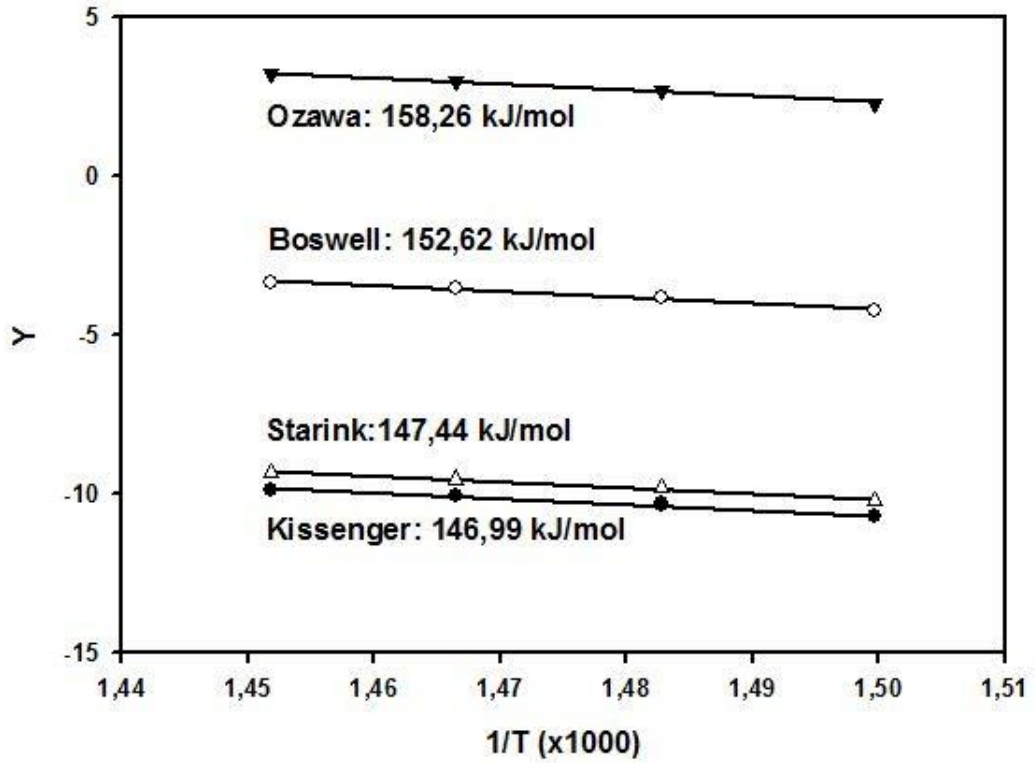
Şekil 4.6. $\epsilon=0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği (Boswell modeli)



Şekil 4.7. $\epsilon=0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği (Ozawa modeli)



Şekil 4.8. $\epsilon=0,33$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^{1,92}) - 1000/T$ grafiği (Starink modeli)



Şekil 4.9. $\epsilon = 0,33$ olan AA5005 sacı için Y – 1000/T grafikleri (Y = Kissenger için $\ln(\beta/T^2)$; Boswell için $\ln(\beta/T)$; Ozawa için $\ln(\beta)$; Starink için $\ln(\beta/T^{1.92})$)

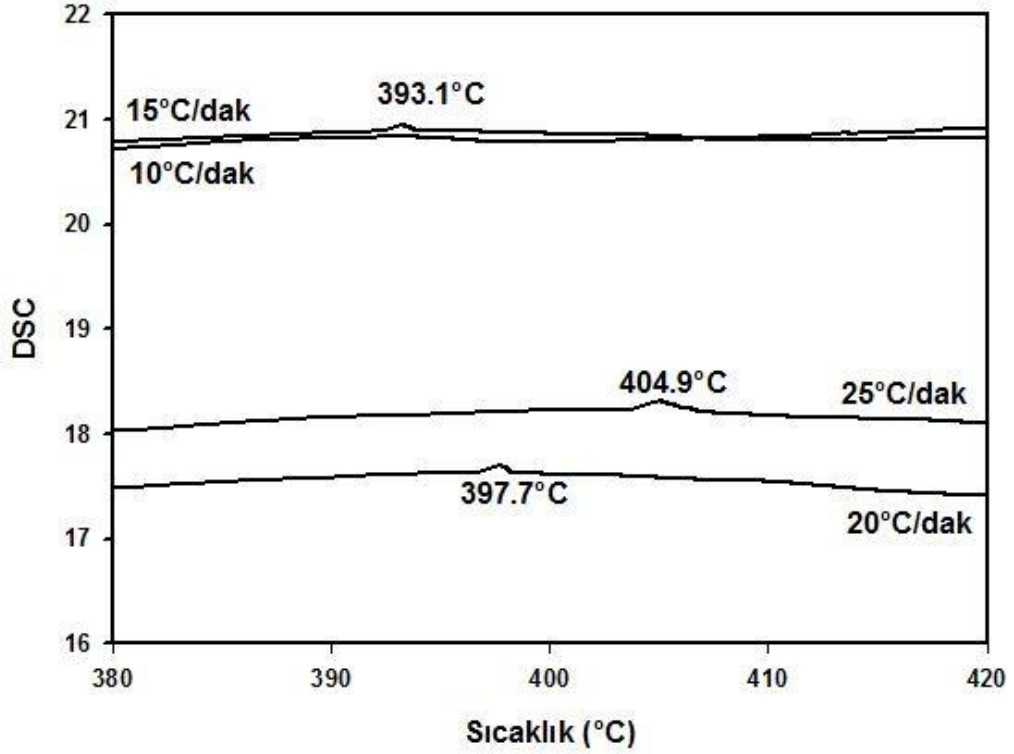
Tablo 4.2. $\epsilon = 0.33$ olan AA5005 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri

Kinetik Yöntem	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	146,99
Boswell	152,62
Ozawa	158,26
Starink	147,44

Tablo 4.2.'de verilen sonuçlara göre $\epsilon = 0.33$ olan AA5005 sacında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin Kissenger modeline göre 146,99 kJ/mol, Boswell modeline göre 152,62 kJ/mol, Ozawa modeline göre 158,26 kJ/mol ve Starink modeline göre 147,44 kJ/mol'dür. Tüm değerler göz önüne alındığında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 147 – 158 kJ/mol aralığında olduğu ifade edilebilir.

Şekil 4.10.'da %74,7 deformasyona uğramış AA5005 sacların 380 – 420°C sıcaklık aralığındaki DSC analizleri verilmiştir. Farklı ısıtma hızlarında alınan DCS eğrilerinde yeniden kristallenme olayı çok küçük ekzotermik pikler olarak gözlenmiş ancak 10°C/dak ısıtma hızında net bir pik gözlenememiştir. Bu nedenle kinetik inceleme 3

sıcaklık hızındaki veriler kullanılarak yapılmıştır. Tespit edilen pik sıcaklıkları ile birlikte kinetik model verileri Tablo 4.3.'de verilmiştir.

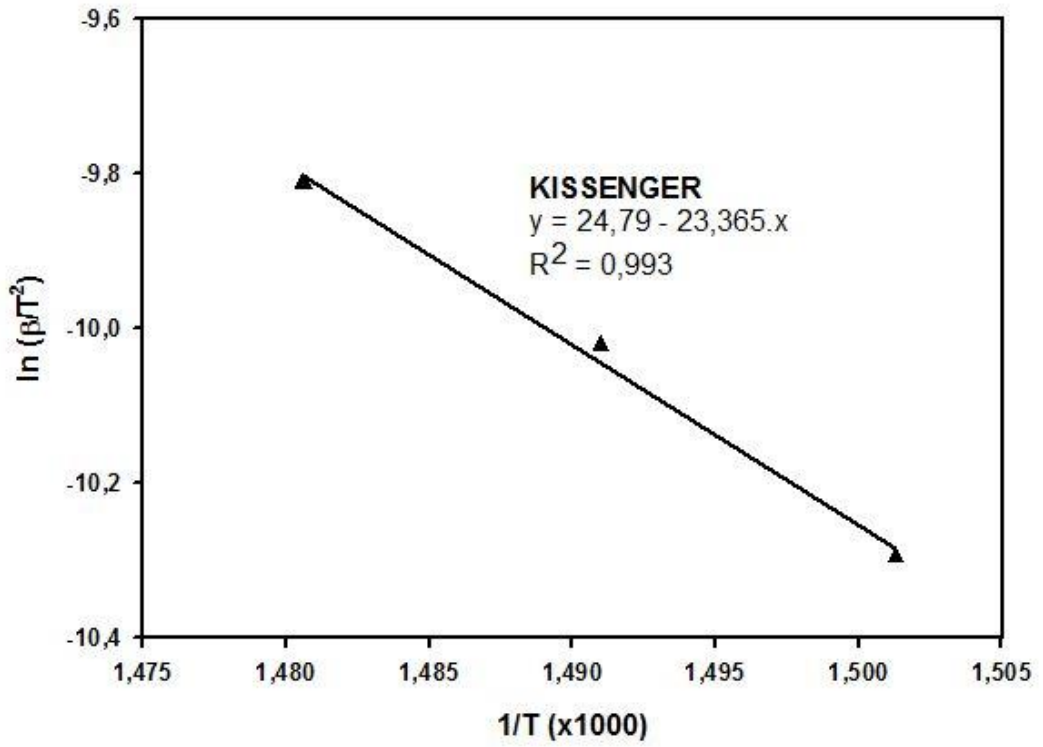


Şekil 4.10.. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacların DSC analizi

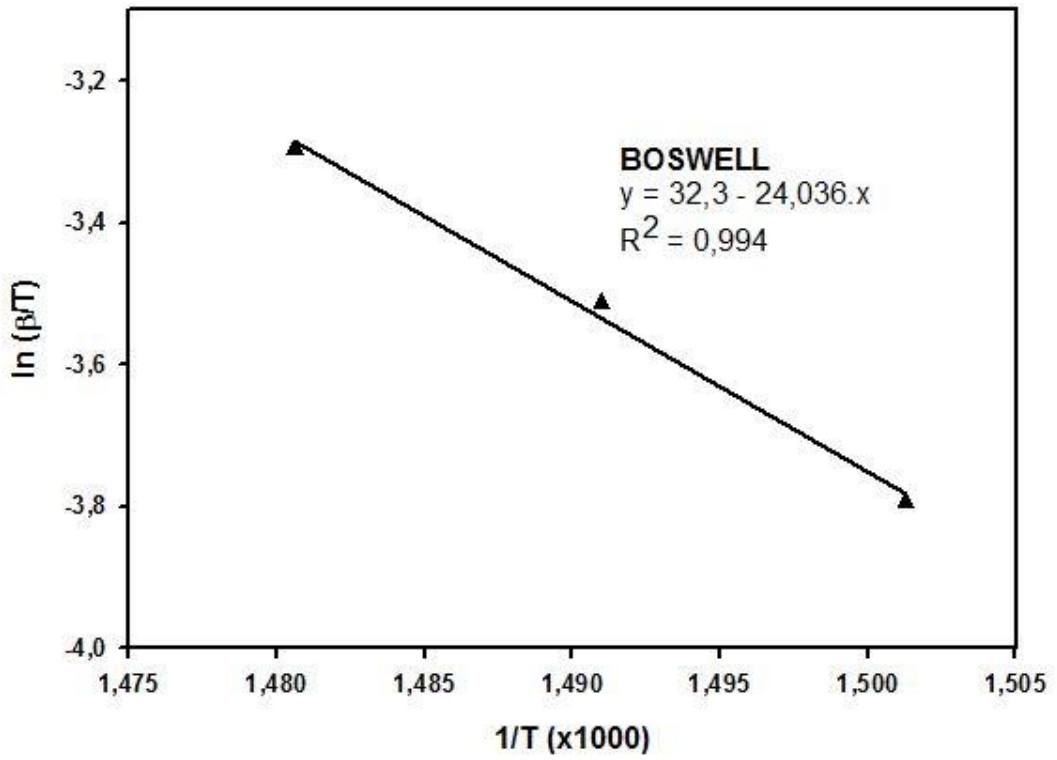
Tablo 4.3. $\epsilon = 0.747$ olan AA5005 sacı için kinetik veriler

β	T (K)	1/T ($\times 10^3$)	Kissenger	Boswell	Ozawa	Starink
			$\ln(\beta/T^2)$	$\ln(\beta/T)$	$\ln(\beta)$	$\ln(\beta/T^{1.92})$
15	666,1	1,5013	-10,2948	-3,7934	2,7081	-9,7747
20	670,7	1,4910	-10,0209	-3,5126	2,9957	-9,5002
25	677,9	1,4751	-9,8191	-3,3001	3,2189	-9,2976

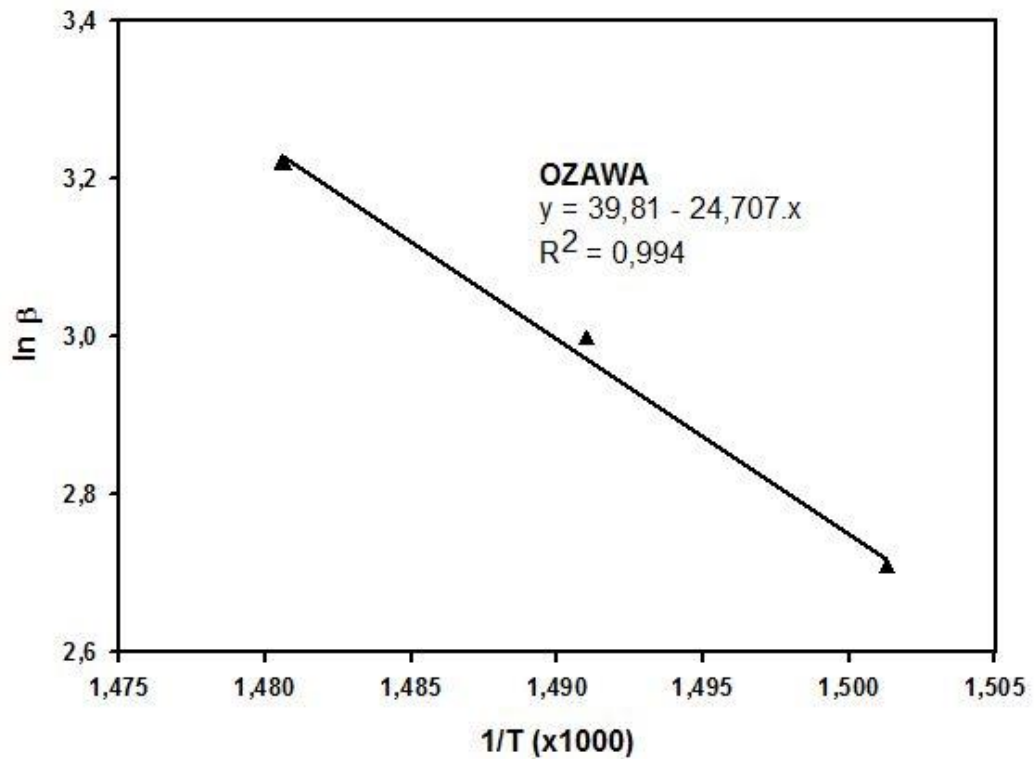
Tablo 4.3.'de ki veriler kullanılarak kinetik analiz yapmak için Şekil 4.11.'de Kissenger modeline göre $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği, Şekil 4.12.'de Boswell modeline göre $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği, Şekil 4.13.'de Ozawa modeline göre $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği ve Şekil 4.14.'de Starink modeline göre $\ln(\beta/T^{1.92}) - 1000/T$ grafiği verilmiştir. Bu 4 modelin birlikte gösterimi Şekil 4.15.'de verilmiştir.



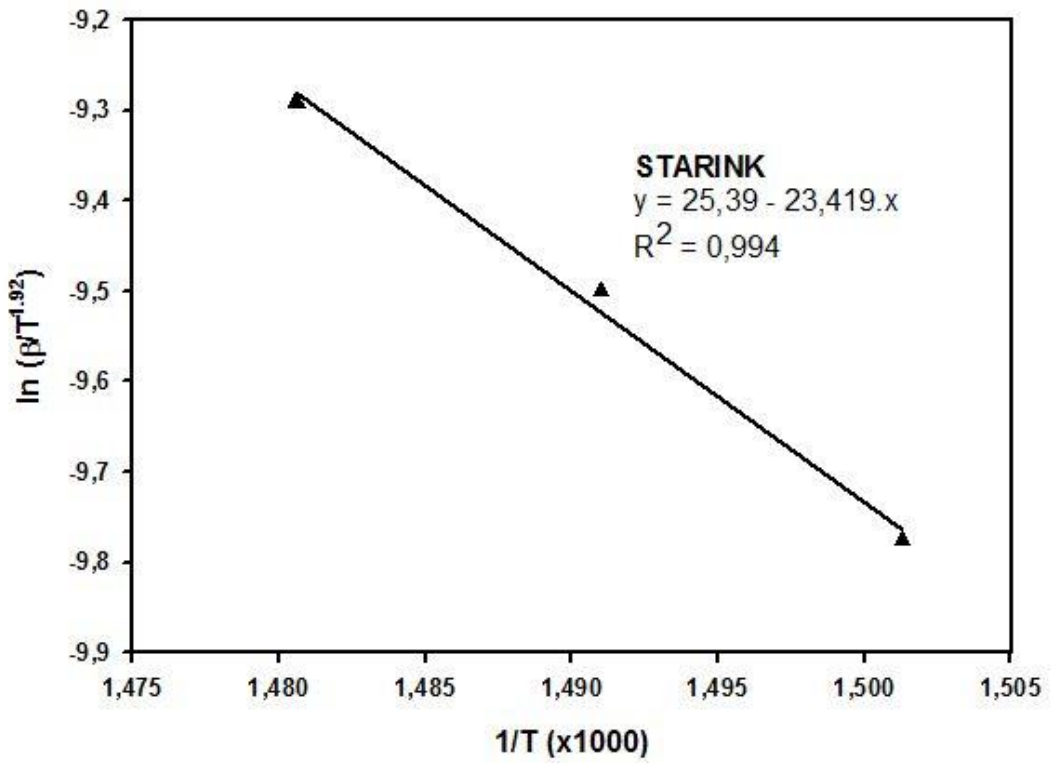
Şekil 4.11. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği (Kissenger modeli)



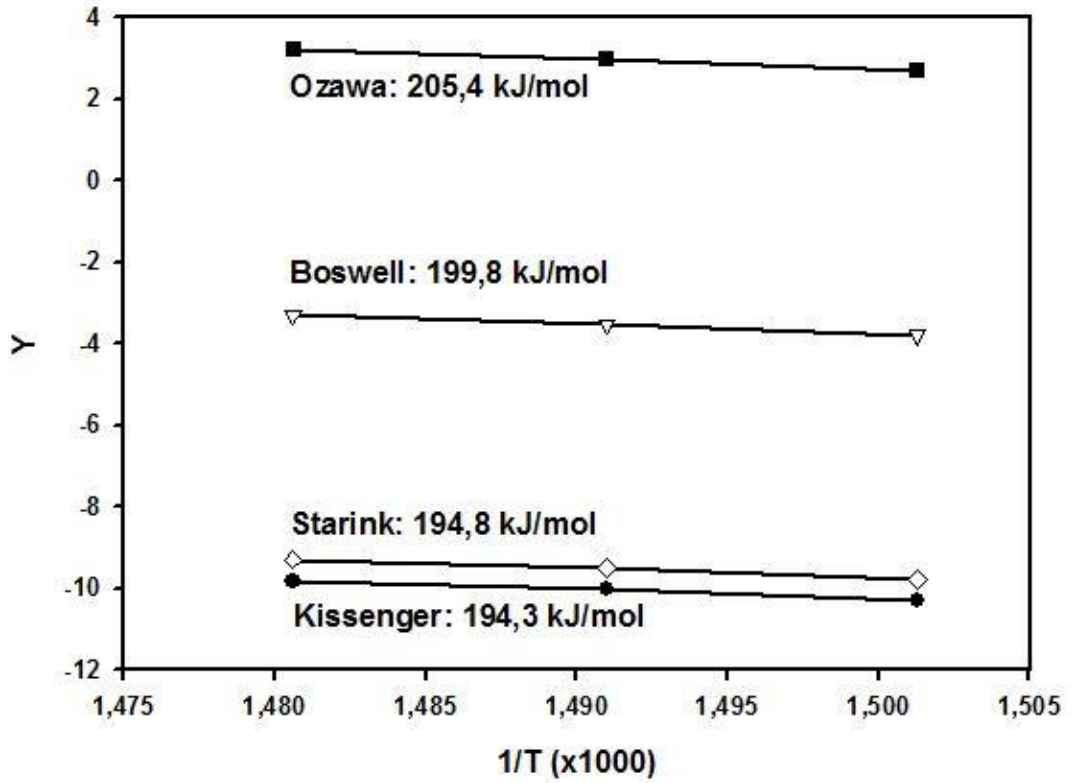
Şekil 4.12. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği (Boswell modeli)



Şekil 4.13. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği (Ozawa modeli)



Şekil 4.14. $\epsilon = 0,747$ olan AA5005 sacı için $\ln(\beta/T^{1,92}) - 1000/T$ grafiği (Starink modeli)



Şekil 4.15. $\epsilon=0,747$ olan AA5005 sacı için $Y - 1000/T$ grafikleri ($Y =$ Kissenger için $\ln(\beta/T^2)$; Boswell için $\ln(\beta/T)$; Ozawa için $\ln(\beta)$; Starink için $\ln(\beta/T^{1.92})$)

Tablo 4.4. $\epsilon = 0.747$ olan AA5005 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri

Kinetik Yöntem	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	194,3
Boswell	199,8
Ozawa	205,4
Starink	194,8

Tablo 4.4.'de verilen sonuçlara göre $\epsilon = 0.747$ olan AA5005 sacında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin Kissenger modeline göre 194,3 kJ/mol, Boswell modeline göre 199,8 kJ/mol, Ozawa modeline göre 205,4 kJ/mol ve Starink modeline göre 194,8 kJ/mol'dür. Tüm değerler göz önüne alındığında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 194 – 205 kJ/mol aralığında olduğu ifade edilebilir.

Literatürde alüminyum alaşımlarının yeniden kristallenme davranışının incelendiği birçok araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genelde tekstür incelemesi üzerine ve çözünen atomların etkisi üzerinedir. Örneğin kütlece %0.05 Si ilave edilmiş alüminyumda yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 125 – 154 kJ/mol olduğu

belirtilmiştir. Alüminyum alaşımlarına kütlece %0.001 Fe ve %0.001 Mg ilaveleri olduğunda DSC ile yapılan kinetik analizde yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 189 -195 kJ/mol olduğu rapor edilmiştir. Soğuk haddelenmiş AA5182 alüminyum alaşımında da yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 255 – 388 kJ/mol aralığında olduğu belirtilmiştir. Yayımlanan çalışmalarda alüminyum alaşımlarında bulunan safsızlıkların yeniden kristallenme davranışını etkilediği ortaya konmuştur (Liu ve ark., 2003; Zhon ve ark., 2003; Wada ve ark., 2016; Yashin ve ark., 2019).

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Soğuk haddelenmiş AA5005 sacın kinetik analizinde elde edilen genel sonuçlar;

- Kinetik analizde kullanılan saclar %33 ve %74.7 soğuk haddelenmiş AA5005 alüminyum alaşım saclarıdır.
- Kinetik analiz Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) ile, numunelerin 10 – 15 – 20 – 25 °C/dak ısıtma hızlarında elde edilmiş grafiklerdeki yeniden kristallenme pik sıcaklıkları ve izotermal olmayan 4 yöntem (Kissenger, Boswell, Ozawa ve Starink) kullanılarak yapılmıştır.
- %33 soğuk deforme olmuş AA5005 alüminyum alaşımında yeniden kristallenme aktivasyon enerjileri Kissenger modeline göre 146,99 kJ/mol, Boswell modeline göre 152,62 kJ/mol, Ozawa modeline göre 158,26 kJ/mol ve Starink modeline göre 147,44 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu deformasyon miktarındaki alaşım için yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 147 – 158 kJ/mol aralığında olduğu tespit edilmiştir.
- %74,7 soğuk deforme olmuş AA5005 alüminyum alaşımında yeniden kristallenme aktivasyon enerjileri Kissenger modeline göre 194,3 kJ/mol, Boswell modeline göre 199,8 kJ/mol, Ozawa modeline göre 205,4 kJ/mol ve Starink modeline göre 194,8 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu deformasyon miktarındaki alaşım için yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 194 – 205 kJ/mol aralığında olduğu tespit edilmiştir.

KANAKÇA

- Alaneme, K. K., & Okotete, E. A. (2018). Recrystallization mechanisms and microstructure development in emerging metallic materials: A review. *Journal of Science Advanced Materials and Devices*, 4(1), 19–33.
- ASM, (1992). *ASM Handbook Volume 2 Properties And Selection: Nonferrous Alloys And Special-Purpose Materials*. ASM International.
- Bhaduri, A. (2018). *Mechanical properties and working of metals and alloys* (Vol. 264, p. 119). Singapore: Springer.
- Boswell, P.G. (1980). On the calculation of activation energies using a modified Kissenger method. *Journal of Thermal Analysis*. 18(2), 353-358.
- Can A.Ç., (2006). *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*, Birsen Yayınları, İstanbul.
- Danchenko, V. N. (2007). *Metal forming*. Dnepropetrovsk: NMetAU.
- Dwight, J., (1999). “*Aluminium Design And Construction*” University Of Cambridge; And Fellow Of Magdalene College, Cambridge, İngiltere.
- Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, 227, 111372.
- Hansen, N., & Barlow, CY. (2014). *Plastic deformation of metals and alloys*. In *Physical metallurgy* (pp. 1681-1764). Elsevier.
- Humphreys, J., Rohrer, G. S., & Rollett, A. (2017). “*Recrystallization and Related Annealing Phenomena*”, Elsevier
- Ikumapayi, O. M., Akinlabi, E. T., Onu, P., & Abolusoro, O. P. (2020). Rolling operation in metal forming: Process and principles–A brief study. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1644-1649.
- Kavaklioğlu, Z.B. (2013). *Alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşme*. 6.Aluminium Symposium, İstanbul.
- Kissenger, H.E. (1957). Reaction kinetics in differential thermal analysis, *Analytical Chemistry*, 29(11), 1702-1706.
- Li, S. (2021). *Sheet metal deep drawing for making metallic parts and structures*. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier.
- Liu, WC., Zhai, T., Man, CS., Morris, JG. (2003). Quantification of recrystallization texture evolution in cold rolled AA 5182 aluminum alloy. *Scripta Materialia*, 49:539–545

- Ma, J., & Welo, T. (2021). Analytical springback assessment in flexible stretch bending of complex shapes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 160(103653), 103653.
- Mondolfo, L. F. (1976). *Aluminum alloys: structure and properties*. Elsevier.
- Ozawa, T. (1992). Estimation of activation energy by isoconversion methods, *Thermochimica Acta*. 203, 159-165.
- Ölmez, S., & Keleşoğlu, E. Alüminyum silisyum alaşımların yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(1), 31-39.
- Ölmez, S., (2016). Alüminyum esaslı alaşımların yüksek sıcaklıkta aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Smallman R.E., & Bishop, R. J. (1999). *Modern physical metallurgy and materials engineering*. (1999). Elsevier.
- Starink, M. (2004). Analysis of aluminium based alloys by calorimetry: quantitative analysis of reactions and reaction kinetics, *International Materials Reviews*. 49(3-4), 191-226.
- Tempelman, E., Shercliff, H., & van Eyben, B. N. (2014). Forging of metals. In *Manufacturing and Design* (pp. 85–103). Elsevier.
- Töre, C., (2012). *Mekanik Tasarımda Alüminyum ve Özellikleri*, Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- Wada, K., Takeshima, K., Uesugi, T., Takigawa, Y., Higashi, K. (2016). Effects of solute Fe, Zn and Mg on recrystallization in aluminum, *Materials Transactions*, 57(3):329-334
- Yashin, V., Aryshenskii, E., Hirsch, J., Konovalov, S., Latushkin, I. (2019). Study of recrystallization kinetics in AA5182 aluminium alloy after deformation of the as-cast structure. *Materials Research Express*, 6(6):066552.
- Zhou, F., Liao, XZ., Zhu, YT., Dallek, S., Lavernia, EJ. (2003). Microstructural evolution during recovery and recrystallization of a nanocrystalline Al-Mg alloy prepared by cryogenic ball milling. *Acta Materialia*, 51:2777-2791.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Atae RAOUGUI

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2021
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2016
Lise	Groupe Atlas Lyce (Rabat, Fas)	2010

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	BSH Home Appliances Group	Teknik Hizmetler Mühendisi
2017 - 2018	Ghent Üniversitesi (Bekçika)	Proje Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce, Fransızca, Türkçe, Arapça (Anadil)

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Atae RAOUGUI, Kenan YILDIZ, Diferansiyel tarama kalorimetrisi ile soğuk haddelenmiş AA5005 levhada yeniden kristallenme kinetiği, Karadeniz Zirvesi, 6.Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, 5-6 Haziran 2021, Sinop

HOBİLER

Futbol, Yüzme, Seyahat