

## AA 2024-T3 Malzemelere Uygulanan Soğuk Şekillendirmenin T8 Isıl İşlemine Olan Etkilerinin İncelenmesi

Erdem Mermer<sup>1,\*</sup> , Hanifi Çinici<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 21.08.2024

**Kabul:** 05.10.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Soğuk işlem

AA2024

Isıl işlem

Mikroyapı

Sertlik

### ÖZET

Havacılık ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarının kullanımı önemli bir yer tutmaktadır. Bu malzemelerden AA2024 alaşımı, özellikle uçakların ana gövde ve kirişlerinde, bağlantı ve perçin malzemelerinde kullanılmaktadır. Bu alaşımların ısıtma işlemi uygulanmamış haliyle mukavemetleri düşük olduğu için, soğuk şekillendirme ve ısıtma işlemi prosesiyle malzemelere mukavemet kazandırılmaktadır. Bu çalışmada, AA2024-T3 malzemelere oda sıcaklığında 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'lik açılarında soğuk şekillendirme yapıp, T8 ısıtma işlemi koşuluna getirmek amacıyla ısıtma işlemi uygulanmıştır. Malzemelerin özellikleri hem T3 ısıtma işlemi koşulunda hem de ısıtma işlemi sonrası T8 koşulunda incelenmiştir. Alaşımların mikroyapıları hem optik hem de taramalı elektron mikroskopları ile incelenmiştir. Ayrıca, alaşımların mikrosertlik ve elektriksel iletkenlik özelliklerindeki değişimleri de araştırılmıştır. Form işlemi yapılmış T3 malzemelerde form açısı arttıkça ortalama tane boyutunda artış meydana gelmiştir. Ayrıca, sertlik değerlerinde de bir miktar artış sağlanmıştır. T8 ısıtma işlemi koşulundaki malzemelerde yapılan analizlerde ise form açısından bağımsız homojen tane boyutları ve yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. T8 ısıtma işlemi koşulundaki mikroyapı analizlerinde tanelerde ikizlenme yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir.

## Investigation of the Effects of Cold Forming Applied to AA 2024-T3 Materials on T8 Heat Treatment

### ARTICLE INFO

**Received:** 21.08.2024

**Accepted:** 05.10.2024

#### Keywords:

Cold forming

AA2024

Heat treatment

Microstructure

Hardness

### ABSTRACT

The use of aluminum alloys in the aviation and space industry has an important place. Among these materials, AA2024 alloy is used especially in the main fuselage and beams of aircraft, as well as in connection and rivet materials. Since the strength of these alloys is low in their non-heat-treated form, the materials are strengthened by cold forming and heat treatment processes. In this study, AA2024-T3 materials were cold formed at room temperature at 30°, 45°, 60°, 75° and 90° angles and heat treatment was applied in order to bring them to T8 condition. The properties of the materials were examined in both T3 heat treatment condition and T8 condition after heat treatment. The microstructures of the alloys were examined with both optical and scanning electron microscopes. In addition, the changes in the microhardness and electrical conductivity properties of the alloys were also investigated. In the T3 materials that underwent the forming process, an increase in the average grain size occurred as the forming angle increased. In addition, a slight increase in the hardness values was also achieved. In the analyses performed on the materials in the T8 heat treatment condition, homogeneous grain sizes independent of form and high hardness values were obtained. In the microstructure analyses in the T8 heat treatment condition, it was observed that twin structures were formed between the grains.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum alaşımları, yüksek korozyon direnci, hafif yapısı, yüksek özgül mukavemeti, düşük sıcaklık direnci ve form edilebilir özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özellikleri dolayısıyla özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde ana gövde ve kirişlerde, bağlantı ve perçin malzemelerinde, boru formunda tercih edilmektedir [1-4]. Bununla beraber, işlem görmemiş

\*Corresponding author, e-mail: mermererdem84@gmail.com

To cite this article: E. Mermer, H. Çinici, Investigation of the Effects of Cold Forming Applied to AA 2024-T3 Materials on T8 Heat Treatment, Manufacturing Technologies and Applications, 5(3), 193-202, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1536610>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

alüminyum malzemeler yumuşak formlu, esnek ve mukavemetten yoksundur. Bu sebeple, soğuk şekillendirme ve ısıtma işlemi prosesleri alüminyum malzemeleri mukavetlendirme bakımından endüstride sıklıkla uygulanan metotlar haline gelmiştir [5]. Alüminyum alaşımları koşulları endüstride; F (üretilmiş hali), O (tavlanmış), H (gerinim sertleştirilmiş), W (çözeltiye alınmış ve soğutulmuş kararsız yapı) ve T (çözeltiden sonraki karalı hal) olarak tanımlanmıştır. T1-T4 arası gösterimler, malzemeye doğal yaşlandırma uygulandığı, T5-T10 arası ısıtma işlemi gösterimleri ise malzemeye yapay yaşlandırma metotlarının uygulandığını göstermektedir [6]. Bu çalışmada kullanılan T3 ısıtma işleminde, alüminyum alaşımlarına önce çözeltiye alma ısıtma işlemi (SHT) sonrasında mukavemeti artırmak için soğuk işlem ve son olarak mekanik özellikleri stabilize etmek amacıyla doğal yaşlanma uygulanırken, T8 ısıtma işlemi durumunda SHT sonrası mukavemeti artırmak için soğuk işlem ve son olarak mekanik özellikler ve boyut kararlılığını sağlamak amacıyla yapay yaşlandırma işlemi uygulanmaktadır. T3 ve T8 ısıtma işlemi koşullarının kullanım amacı ise soğuk işleme sebebiyle, artan sayıda dislokasyondan dolayı daha fazla çökelti parçacığının çekirdeklenmesi ve buna bağlı olarak yüksek mukavemet elde edilmesidir [7].

6XXX serisi alüminyum alaşımları ana alaşım elementi olarak Mg ve Si içermektedir ve bu elementler diğer bileşen alaşım elementleriyle birlikte yarı kararlı çökeltilerin ( $Mg_5Si_6$ ) ve kararlı çökeltilerin ( $Mg_2Si$ ) oluşumunda önemli rol oynamaktadır [8,9]. 6XXX serisi alüminyum alaşımları, 2XXX/7XXX serisi alaşımlarına göre daha düşük mukavemete sahi olmasına rağmen çok iyi korozyon direncine sahiptir, son derece şekillendirilebilir alaşımlardır. Genellikle yapısal, savunma, inşaat, mimari ve denizcilik uygulamalarında kullanılırlar. 6XXX serisi alüminyum alaşımları, katı çözelti güçlendirme, soğuk şekillendirme ve yaşlandırma sertleştirilmesi mekanizmaları ile mukavemetlendirilmektedir [10–12].

Alüminyum 7XXX serisi, Zn elementinin ana alaşım elementi olduğu ve ayrıca diğer alaşım elementlerini (Mg, Cr ve Cu) de içeren yüksek mukavemetli alaşımlardır [13,14]. Hem ısıtma işlemi hem de soğuk deformasyon yöntemi ile alaşımların mukavemeti önemli derecede artırılabilir. 7XXX, alaşımlarından 7050, 7075 ve 7475 alaşımları havacılık sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır [15,16].

2XXX alüminyum alaşımları ana alaşım elementi olarak Cu elementi içerir ve ısıtma işlemi görebilen alaşımlardır. Bu özelliği sayesinde havacılık sektöründe önemli oranda kullanıma sahiptir. Alüminyum 2XXX serisinin ısıtma işlemi prosesinde, alaşım öncelikle solüsyona alma prosesine tabi tutulmaktadır, akabinde ise mukavemet kazandırmak amacıyla oda sıcaklığında doğal yaşlandırma veya fırın vasıtasıyla yapay olarak yaşlandırılabilir.  $Al_2CuMg$  ve  $CuAl_2$  fazları yaşlandırma ısıtma işlemi sonucu oluşan fazlardır ve akma mukavemetini arttırırken uzamayı azaltmaktadırlar. Bu alaşımların en büyük sınırlaması, ısıtma işlemi sonrasında gerçekleşebilecek olan bakır elementi difüzyonudur, bu durumda ise tanecikler arası korozyon oluşma ihtimali bulunmaktadır. 2XXX alaşımları T3, T4, T6 ve T8 ısıtma işlemi koşullarında kullanılmaktadır.

Yapılan bir çalışmada [17], 2024 alaşımın geleneksel T8 ısıtma işlemiyle karşılaştırıldığında, kriyojenik deformasyonun daha düşük bir yaşlanma sıcaklığına sebep olduğu gözlenmiştir. Bakavos [18] tarafından 2022 ve 2139 alaşımları ile yapılan çalışmada Ag elementi eklendiğinde,  $\Omega$  fazının dominant faz olduğu ispatlanmıştır. Tao [19] tarafından yapılan çalışmada bilyalı dövme prosesinin 2060 T8 alaşımında hem mekanik özellikleri arttırdığı hem de iç yapıyı modifiye ettiği gözlenmiştir. Al-Li alaşımlarında yapılan ve T6 ve T8 ısıtma işlemi kondisyonlarının karşılaştırdığı çalışmada, T8 ısıtma işlemi koşulundaki alaşımın daha iyi korozyon direnci özellikleri gösterdiği anlaşılmıştır [20]. Goodarzy [21], deforme olmuş ve yaşlanmış malzemenin sertliğinde ve akma mukavemetindeki önemli artışların olduğunu, dislokasyon yoğunluğundaki artışa ve bunların eşit kanallı açılma presleme (ECAP) sırasında birbirleriyle ve çözünen atomlarla etkileşimlerine bağlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bunun yanında, AL-Cu-Li alaşımlarının T3 ve T8 alaşımlarında iç yapıları ve yorulma davranışlarına bakılmış, T8 ısıtma işlemi koşulundaki alaşımın yorulma dayanımının yükseldiği ve iç yapısının daha homojen olduğu gözlenmiştir [22]. Bununla beraber, T3 ısıtma işlemi koşulundaki yapısal soğuk plastik deformasyonun T8 ısıtma işlemi koşuluna olan etkileri ile ilgili literatürde bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma farklı açılarda plastik deformasyonların etkilerini araştırarak,

mikro yapıları ve sertlik değerlerini analiz ederek literatüre önemli bir katkı sağlamakta ve endüstriyel uygulamalara örnek teşkil etmektedir.

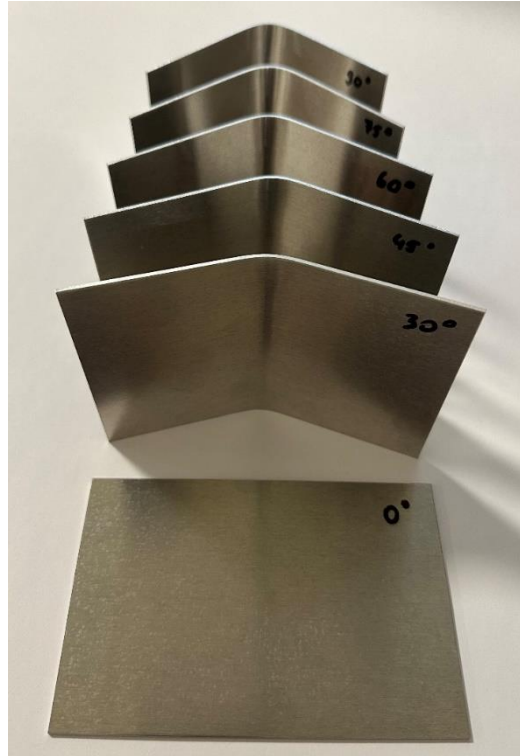
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada kullanılan AA2024 malzemelerin kimyasal kompozisyonları X-Işını Floresansı (XRF) tekniği ile belirlenmiş olup, analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Analiz sonuçları havacılık sanayinde kullanılan AMS QQ-A-250/4 standardı gerekliliklerini karşılamaktadır.

Tablo 1. AA2024 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of AA2024 alloy)

Element	Al	Cu	Mn	Mg	Fe	Si	Cr	Zn	Ti
Analiz Sonucu	Denge	4.6	0.5	1.5	0.2	0.3	0.03	0.1	0.04

Soğuk deformasyon prosesi oda sıcaklığında malzemelere farklı açılarda form verilmesiyle gerçekleşmiştir. Bu çalışmada, T3 ısıtma işlemi koşulundaki 100x120x1.6 mm boyutlarında olan AA2024 malzemelerine Şekil 1 ‘de görüldüğü üzere 30°,45°,60°,75° ve 90° açılarında soğuk şekil verme prosesi uygulanmıştır. Soğuk şekil verilmiş malzemeler 191 °C’de 12.30 saat yaşlandırma ısıtma işlemine tabi tutulup T8 ısıtma işlemi koşuluna getirilmiştir. Malzemelere hem ısıtma işlemi öncesi hem de ısıtma işlemi sonrası elektriksel iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Elektriksel iletkenlik testi Verimet M4900C cihazı ile yapılmıştır. Mikrosertlik ve mikroyapı özelliklerini anlamak amacıyla, malzemeler metalografik olarak hazırlanmıştır. Numune kesimi ATM Brilliant 250 cihazı ile gerçekleştirilmiş, kesilen numuneler Struers CitoPress 30 cihazı yardımıyla bakalite alınmıştır. Struers Laboforce-100 cihazı kullanılarak da numunelere zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Optik mikroskop incelemeleri Nikon Eclipse MA100 mikroskop ile taramalı elektron mikroskopu-enerji dispersiyon spektroskopisi analizleri (SEM-EDS ise LaB6 emitörlü Zeiss EVO 10 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tane boyut analizi ASTM E112 metoduna göre yapılmıştır. Mikrosertlik testleri Emcotest Durascan test cihazıyla ASTM E384 metoduna göre yapılmıştır. Sertlik testinde, 136° açılı elmas piramit uçla 300gf (HV0.3) kuvvet uygulanmıştır. Her bir vickers izi için 7 sn yük uygulanmıştır.

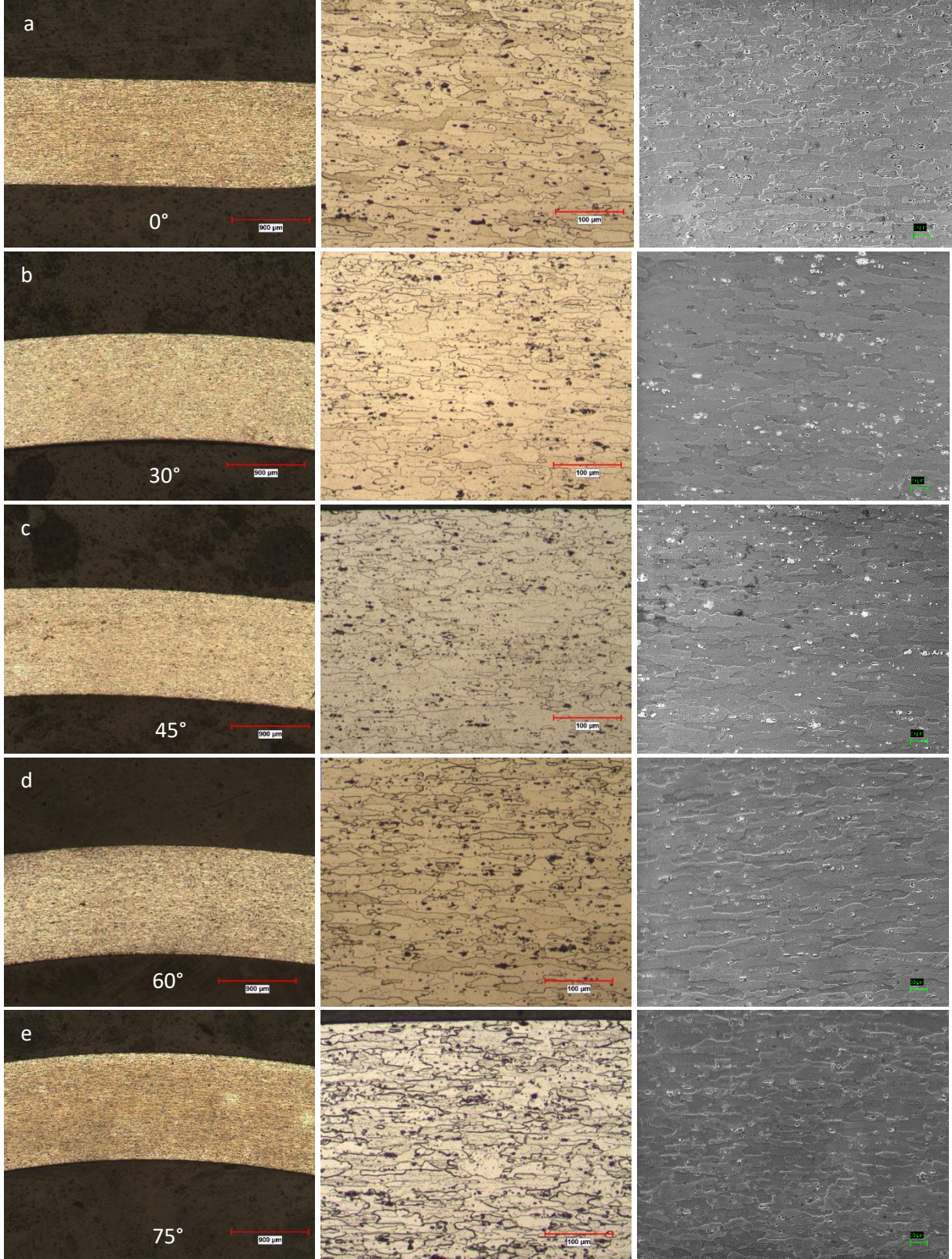


Şekil 1. 0°,30°, 45°, 60°, 75° ve 90° açılar ile soğuk şekillendirilmiş test numuneleri (Cold formed test samples at 0°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°)

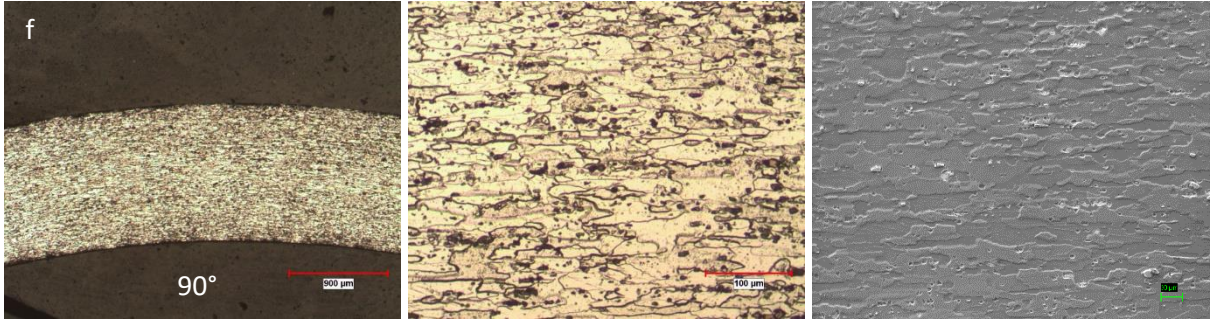


### 3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ (EXPERIMENT RESULTS AND EXAMINATION)

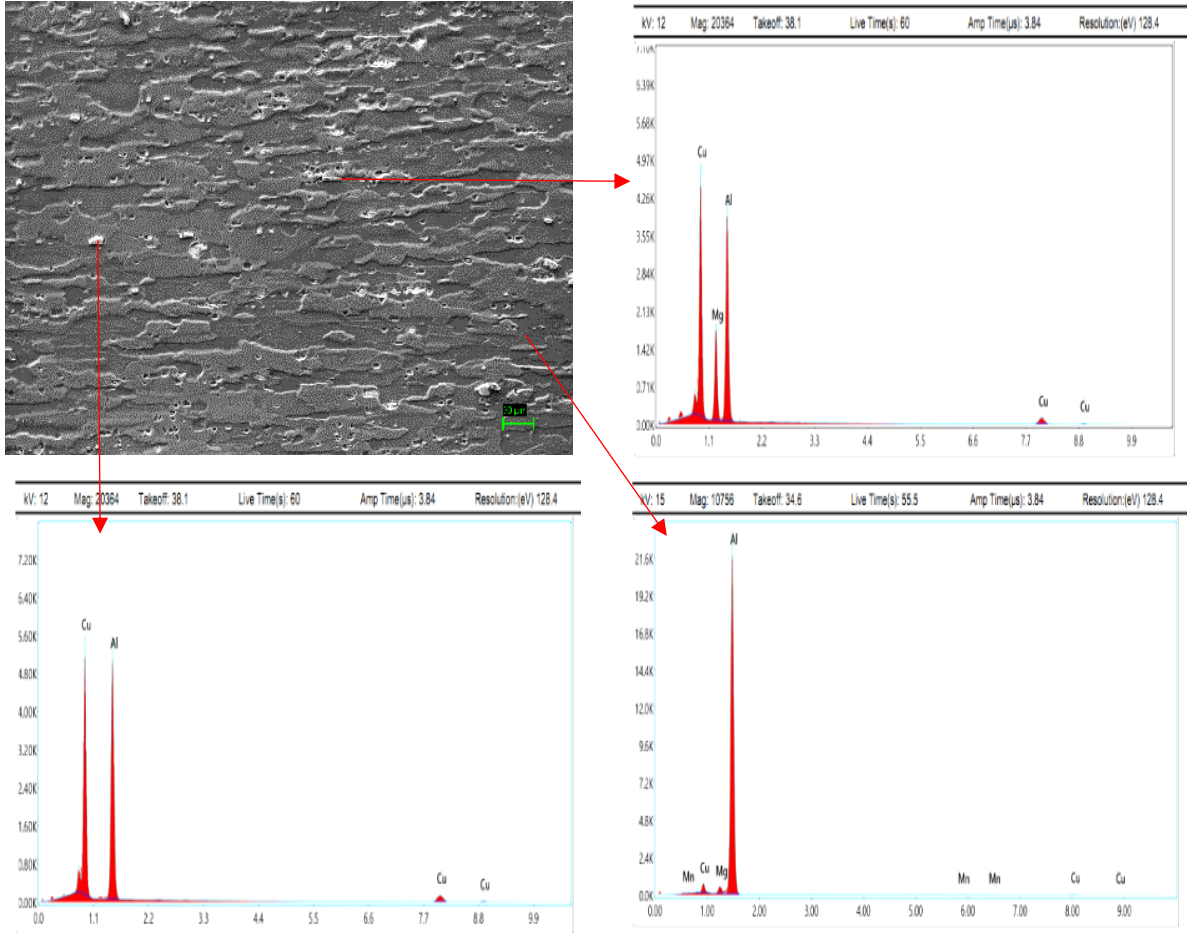
Soğuk şekillendirme yapılmış T3 ısıtma işlemi koşulundaki malzemelerin form açılarının mikroyapı ve sertlik değişimlerini anlamak amacıyla malzemelerin analizleri yapılmıştır. Şekil 2’de malzemelerin hem optik hem de taramalı elektron mikroskobunda çekilmiş içyapı fotoğrafları verilmiştir.





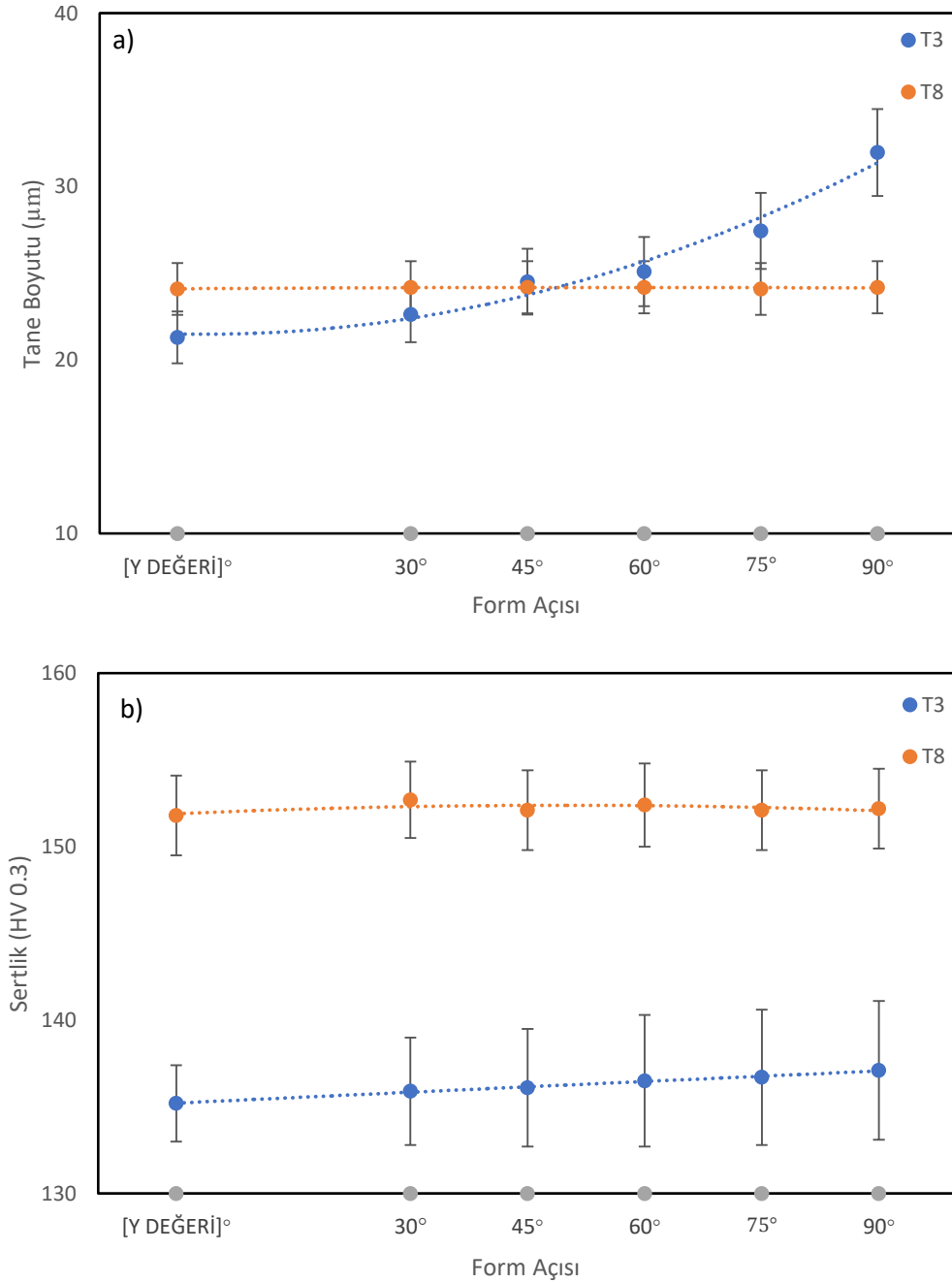


Şekil 2. AA2024 T3 Optik ve SEM optik ve SEM fotoğrafları a) 0°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75° ve f) 90° (AA2024 T3 optical and SEM photos a) 0°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75° ve f) 90°)



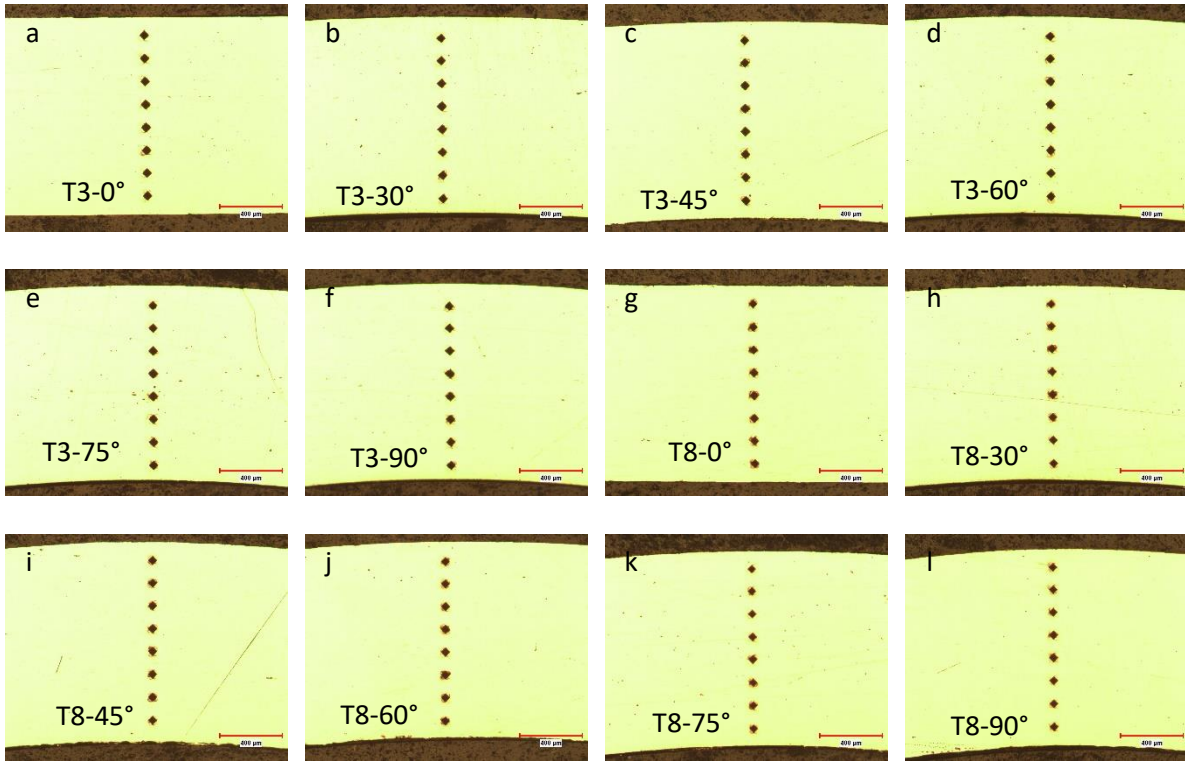
Şekil 3. AA2024 fazlarının EDS Analizleri (EDS analysis of AA2024 phases)

Şekil 2’de önce form verilmiş malzemelerin genel görünüşü, optik mikroskop görünüşü ve son olarak SEM’de alınmış fotoğraflar yer almaktadır. Şekil 2’den anlaşılacağı üzere iç yapıda önemli bir değişim gözlenmemiştir. Şekil 3’te verilen EDS analizlerinde ise optik mikroskopta siyah, SEM’de beyaz renkte yer alan fazın atomik olarak 67.01 % Al ve 32.99 % Cu bakır elementleri içerdiği anlaşılmıştır. Bu faz ise 2024 malzemelerde ana faz olan  $Al_2Cu$  fazıdır, diğer yandan açık gri renkli kısımlar ise EDS analizleri sonucu (20.12 % Cu, 19.93 % Mg ve 59.95 %Al)  $AlCu_2Mg$  olarak saptanmıştır. Ayrıca, matristen alınan EDS analizinin, AA2024 malzemenin XRF tekniği ile elde edilen sonuçlar ile benzer olduğu gözlenmiştir. EDS sonuçları literatür bulgularıyla karşılaştırıldığında, sonuçların benzer olduğu görülmüştür [23]. Literatürde de verildiği üzere form işlemi makro/mikro ölçekte tane boyutlarında ve sertlik değerlerinde değişime yol açmaktadır [24], bu yüzden plastik deformasyona uğramış malzemelerde tane boyutu ve sertlik analizleri yapılmıştır.



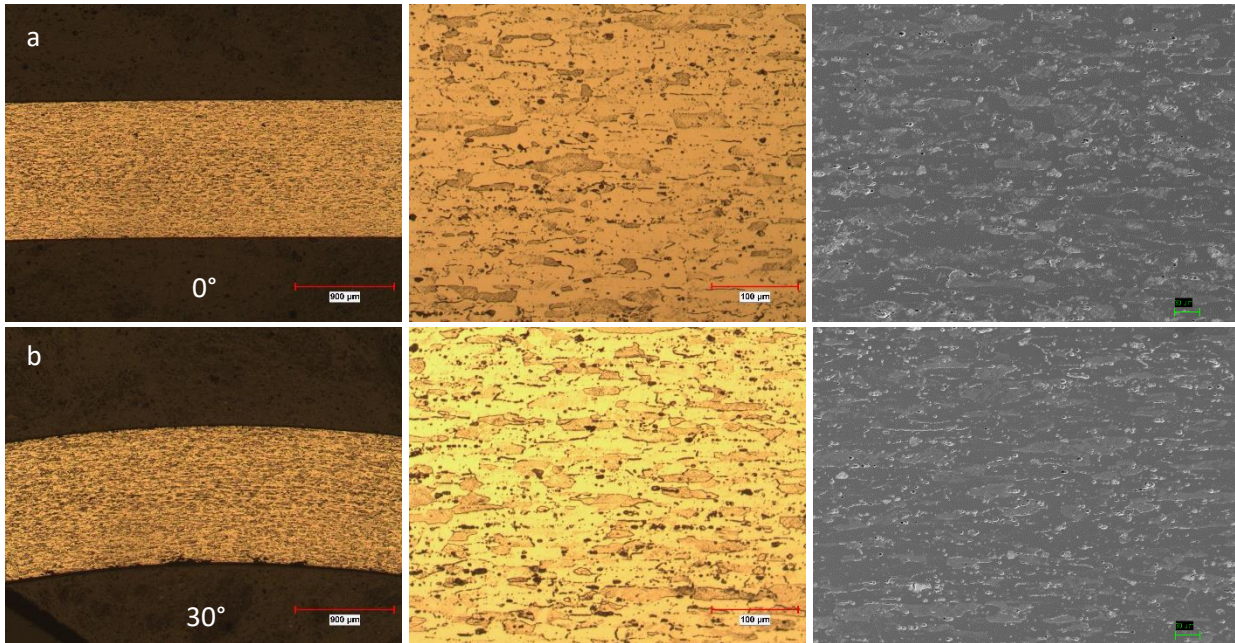
Şekil 4. AA2024 T3 ve AA2024 T8 a) Tane Boyutu ve b) Sertlik değerlerinin form açısıyla değişimi (Change of AA2024 T3 and AA2024 T8 a) Grain Size and b) Hardness values with form angle)

Malzemelerin tane boyutları değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4 a)'da görüleceği üzere T3 koşulundaki malzemelerde form açısı arttıkça ortalama tane boyutunda artış meydana gelmiştir. Ayrıca, grafikteki ortalama değerlerin alt üst noktaları incelendiğinde, form açısı arttıkça sapmanın da arttığı anlaşılmıştır. Şekil 4 b)'de verilen sertlik değerlerine bakıldığında da yine T3 koşulundaki alaşımların sertlik değerlerinde az da olsa artış olduğu anlaşılmıştır. Sertlik değerlerindeki artışın sebebi, plastik şekil değiştirdikçe şekil değişim miktarıyla orantılı bir şekilde dayanımın artması yani pekleşmedir [25]. Pekleşme sırasında, dislokasyon sayısında artış meydana gelmektedir, bu durum da sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur [26]. Sertlik testi malzemelere metalografik olarak parlatılmış durumda uygulanmış ve izlerin olduğu görüntüler Şekil 5'te verilmiştir.

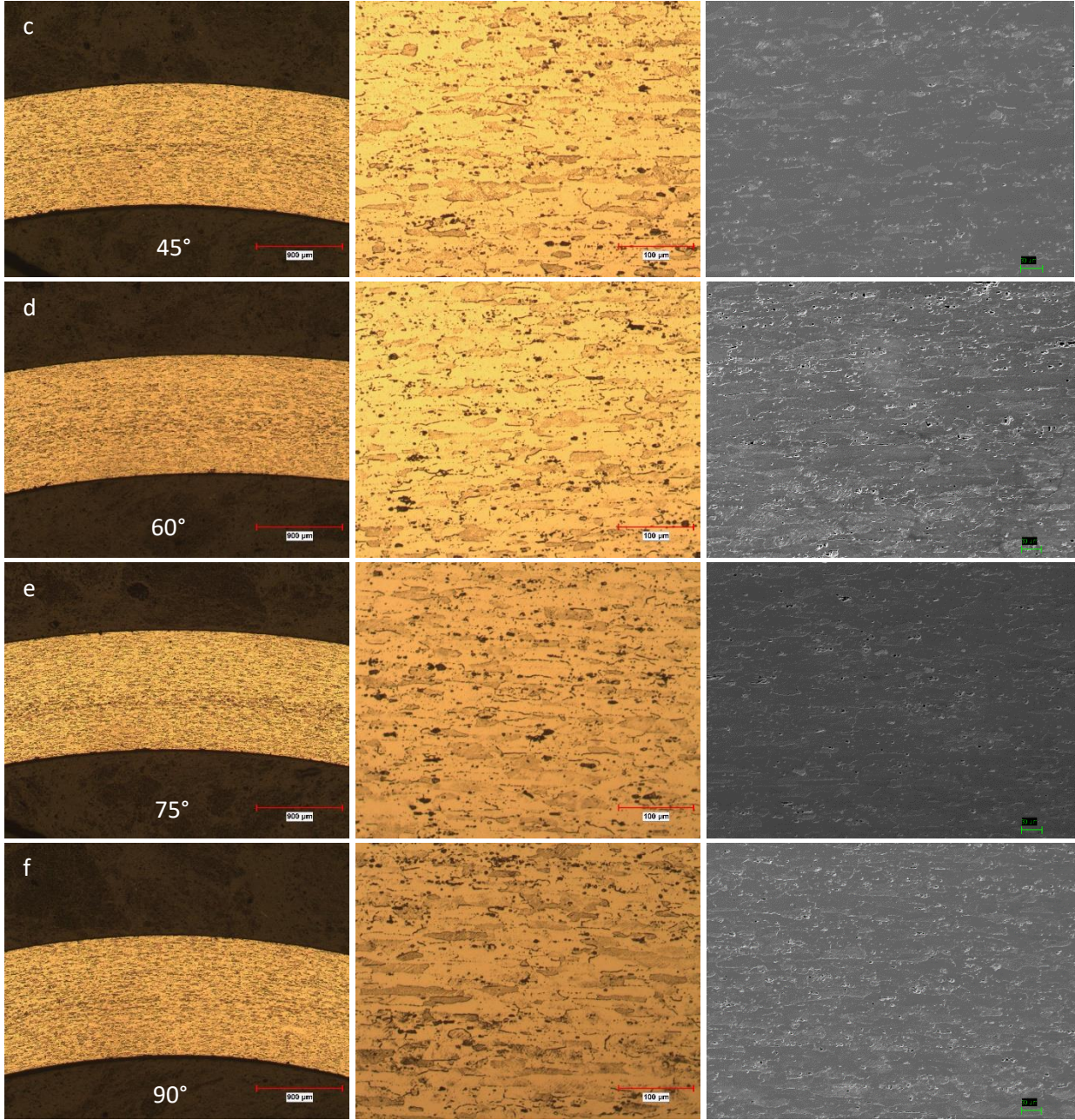


Şekil 5. T3 ve T8 ısıtılmış numunelerde sertlik ölçümü (Hardness measurement on T3 and T8 heat treated samples)

Plastik deformasyona uğrayan numunelere uygulanan T8 yaşlandırma ısıtılmasını kontrol etmek amacıyla öncelikle elektriksel iletkenlik testi uygulanmıştır. Yapılan elektriksel iletkenlik testlerinde tüm numunelerde ortalama 38.2 % IACS elektriksel iletkenlik değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, AMS 2658 standardı kapsamında T8 ısıtılmasının doğruluğunu göstermektedir.





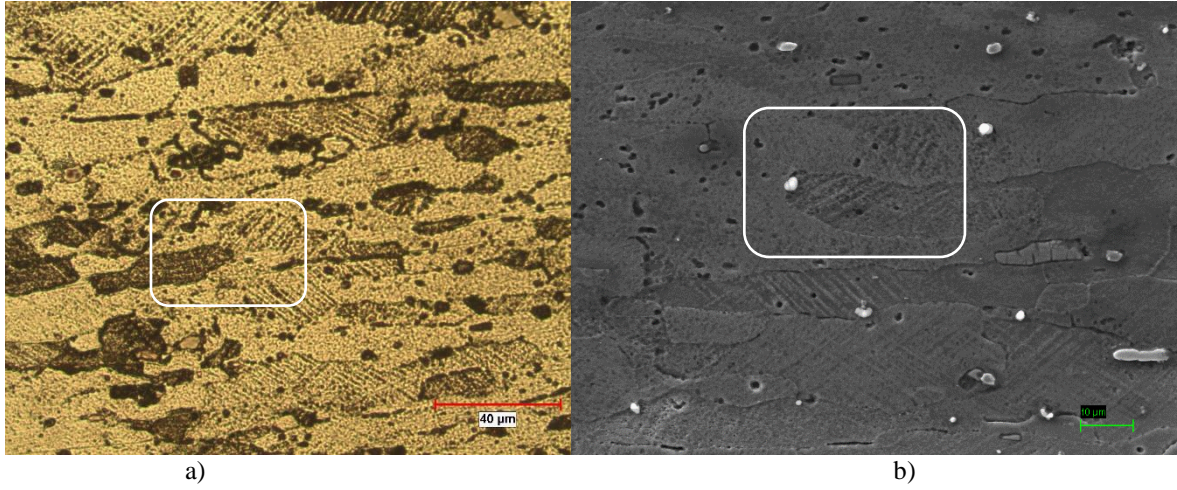


Şekil 6. AA2024 T8 Optik ve SEM mikroyapı fotoğrafları a) 0 °, b) 45°, c) 60°, d) 75°, e) 90° (AA2024 T8 optical and SEM micrographs a) 0 °, b) 45°, c) 60°, d) 75°, e) 90°)

Şekil 6'da T8 ısıtılma işlemi koşuluna getirilen malzemelerin iç yapıları verilmiştir. Görüntülerden anlaşılacağı üzere ısıtılma işlemi sonrası homojen iç yapılar elde edilmiştir. Şekil 4'te verilen ortalama tane boyutu ve sertlik analizlerine bakıldığında da hem ortalama tane boyutlarının hem de sertlik değerlerinin form açısı ile değişmediği gözlemlenmiştir. Isıtılma işlemi sonrası,  $152 \pm 2$  HV ortalama sertlik ve  $24 \pm 1$  µm ortalama tane boyutu elde edilmiştir. Su [27] tarafından yapılan çalışmada 2024 T8 alaşımının ortalama sertlik değeri 159 HV bulunmuştur, dolayısıyla bu çalışmada bulunan veriler ile benzer olduğu anlaşılmıştır. Aynı çalışmada sertlik artışının sebebi, T8 işlemi sırasında alaşımda dislokasyonların oluşması ve çökeltiler için T3'e göre daha fazla çekirdeklenme alanı sağlaması olarak açıklanmıştır.

Şekil 7'de gösterilen T8 ısıtılma işlemi koşulundaki iç yapılar malzemelerin T3'teki iç yapısı ile karşılaştırıldığında, T8 koşulundaki malzemelerde ikizlenme yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu yapıların istifleme hatalarından (SFE) kaynaklı olduğu literatürde belirtilmektedir [28]. SFE ve buna bağlı olarak tanelerde ikizlenme, düşük sıcaklıkta yapılan yüksek gerinim oranında deformasyon koşulları ile oluşmuştur [29].





Şekil 7. AA2024 T8; a) Optik, b) SEM içyapı fotoğrafları (AA2024 T8; a) Optical, b) SEM micrographs)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışma sonucunda T3 ısıtma işlemi koşulunda yapılan form işleminin T8 ısıtma işlemine olan etkileri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- T3 ısıtma işlemi koşulunda farklı derecelerde yapılan plastik deformasyon sonucu, sertlik ve ortalama tane boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir. Form açısı arttıkça bu artış daha belirgin hale gelmiştir. Form açısı 90°'ye geldiğinde ortalama tane boyutu yaklaşık %30 artış göstermiştir. Sertlik değerlerinde ise yaklaşık 2 HV0.3 artış gerçekleşmiştir.
- T8 ısıtma işlemi koşulunda yapılan analizlerde, tane boyutlarının ve sertlik değerlerinin form açısıyla değişmediği görülmüştür. Tane boyutları  $24 \pm 1 \mu\text{m}$ , sertlik değerleri ise  $152 \pm 2 \text{ HV0.3}$  olarak ölçülmüştür. Isıl işleme birlikte tane yapılarında homojenlik gözlemlenmiştir.
- T3 ısıtma işlemi koşulunda yapılan form verme işlemi sonrasında uygulanan T8 ısıtma işleminin iç yapılarda ikizlenme yapılarına neden olduğu gözlemlenmiştir. İstiflenme hatası sonucu oluşan bu yapılara, oda sıcaklığında yapılan plastik deformasyonun sebep olmuştur.

Bu çalışmada bulunan sonuçlar, endüstride alüminyum alaşımlara uygulanan ısıtma işlemi ve plastik deformasyon proseslerindeki çıktıların yorumlanması için referans teşkil etmektedir. Gelecekteki çalışmalarda farklı ısıtma işlemi koşullarında çalışma yapılarak alüminyum malzemelerdeki özellik değişimlerini değerlendirmek mümkün olabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1 Ç. Batuk, H. Demirtaş, Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 Alüminyum Alaşımılı Sacların Mekanik Özellikler Yönünden İncelenmesi, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 4(3):167–178, 2023.
- 2 Y.M. Khalid, R. Umer, K.A. Khan, Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications, Results in Engineering, 20(101372), 2023.
- 3 P. Susmitha, S.V. Kumar, A critical review on the effect of various sustainable reinforcements on armor grade aluminum alloys, Materials Today: Proceedings, 03(039), 2024.
- 4 G. Liu, Y. Ren, W. Ma, K. Morita, Y. Lei, S. Zhan, S. Li, Z. Wang, R. Li, Recent advances and future trend of aluminum alloy melt purification: A review, J. Mater. Res. Technol., 28:4647–4662, 2024.
- 5 L.Y. Zhao, Q.Z. Yang, Z. Zhang Z, G. Su, L.X. Ma, Double-peak age strengthening of cold-worked 2024 aluminum alloy Acta Mater., 61: 1624–1638, 2013.
- 6 A.E. Starke, Aluminum alloys: alloy, heat treatment, and temper designation, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 106-107, 2001.
- 7 H.A. Rashed, A.M. Rashid, Heat Treatment of Aluminum Alloys, Comprehensive Materials Finishing, 2:337–371, 2017.
- 8 A. Jaafar, A. Rahmat, Z. Hussain, I. Zainol, Effect of Mg, Si and Cu content on the microstructure of dilute 6000 series aluminium alloys, Journal of Alloys and Compounds, 509:8632–8640, 2011.

- 9 K.A. Gupta, J.D. Lloyd, A.S. Court, Precipitation hardening in Al–Mg–Si alloys with and without excess Si, *Materials Science and Engineering: A*, 316(2):11–17, 2001.
- 10 R.O. Myhr, T. Borvik, D.C. Marioara, S. Wenner, S.O. Hopperstad, Nanoscale modelling of combined isotropic and kinematic hardening of 6000 series aluminium alloys, *Mech. Mater.*, 151(103603), 2020.
- 11 J.A. Tomstad, S. Thomesen, T. Borvik, S.O. Hopperstad, Effects of constituent particle content on ductile fracture in isotropic and anisotropic 6000-series aluminium alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 820(141420), 2021.
- 12 R.M. Langille, J.B. Diak, F. De Geuser, A. Deschamps, G. Guiglionda, Asymmetry of strain rate sensitivity between up- and down-changes in 6000 series aluminium alloys of varying Si content, *Materials Science and Engineering: A*, 788(139517), 2020.
- 13 T. Rahmaan, C. Butcher, S. Kim, J.M. Worswick, Characterization and prediction of fracture in 6000- and 7000-series aluminum alloy sheet under various stress states, *Thin-Walled Struct.* 173(108958), 2022.
- 14 K. Omer, C. Butcher, M. Worswick, Characterization and application of a constitutive model for two 7000-series aluminum alloys subjected to hot forming, *Int. J. Mech. Sci.*, 165(105218), 2020.
- 15 P. Bamberg, G. Gintrowski, Z. Liang, A. Schiebahn, U. Reisgen, N. Precoma, C. Geffers, Development of a new approach to resistance spot weld AW-7075 aluminum alloys for structural applications: an experimental study – Part 1, *J. Mater. Res. Technol.*, 15: 5569–5581, 2021.
- 16 H.A. Siddiqui, P. Tiwari, P.J. Patil, A. Tewari, S. Mishra, Yield locus and texture evolution of AA7475-T761 aluminum alloy under planar biaxial loading: An experimental and analytical study, *J. Alloys Compd.*, 1000(175115), 2024.
- 17 A. Shahsavari, F. Karimzadeh, A. Rezaeian, H. Heydari, Significant Increase in Tensile Strength and Hardness in 2024 Aluminum Alloy by Cryogenic Rolling, *Procedia Mater. Sci.*, 11:84–88, 2015.
- 18 D. Bakavos, B.P. Prangnell, B. Bes, F. Eberl, The effect of silver on microstructural evolution in two 2xxx series Al-alloys with a high Cu:Mg ratio during ageing to a T8 temper, *Materials Science and Engineering: A*, 491: 214–223, 2008.
- 19 X. Tao, Y. Gao, Effects of wet shot peening on microstructures and mechanical properties of a 2060-T8 aluminum-lithium alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 832(142436), 2022.
- 20 H. Li, Y. Tang, Z. Zeng, F. Zheng, Exfoliation corrosion of T6- and T8-aged Al<sub>x</sub>Cu<sub>y</sub>Li<sub>z</sub> alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18:778–783, 2008.
- 21 H.M. Goodarzy, H. Arabi, A.M. Boutorabi, H.S. Seyedein, S.H. Najafabadi, The effects of room temperature ECAP and subsequent aging on mechanical properties of 2024 Al alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 585:753–759, 2014.
- 22 P. Wang, L. Ye, Y. Deng, Z. Guo, Y. Zhang, Z. Shen, Y. Xu, Enhanced fatigue crack propagation resistance of a new Al–Cu–Li alloy via different aging processes, *J. Mater. Res. Technol.*, 30:5368–5380, 2024.
- 23 G. Mrowka, J. Sieniawski, Analysis of Intermetallic Phases in 2024 Aluminum Alloy, *Solid State Phenomena*, 197:238–243, 2013.
- 24 J. Xu, X. Zhu, D. Shan, B. Guo, T. Langdon, Effect of grain size and specimen dimensions on microforming of high purity aluminum, *Materials Science and Engineering: A*, 646:207–217, 2015.
- 25 S. Sabari, G.D. Andrade, C. Leitão, F. Simões, M.D. Rodrigues, Influence of the strain hardening behaviour on the tensile and compressive response of aluminium auxetic structures, *Composite Structures*, 305(116472), 2023.
- 26 G. Zhang, Z. Zhu, J. Ning, C. Feng, Dynamic impact constitutive relation of 6008-T6 aluminum alloy based on dislocation density and second-phase particle strengthening effects, *Journal of Alloys and Compounds*, 932(167718), 2023.
- 27 X. Jia, R.M. Su, W.J. Zhang, L. Li, Y. Quand, D.R. Li, Effect of Cold-Drawing Deformation on the Microstructure and Properties of AA2024-T8, *Physics of Metals and Metallography*, 124:1501–1508, 2024.
- 28 J. Chen, Y. Ding, X. Zhang, Y. Gao, Y. Ma, Intrinsic stacking fault energy and mechanism for deformation twin formation of solid solution matrix in Ni-based superalloys, *Vacuum*, 203(11132), 2022.
- 29 B. Guo, M. Song, X. Zhang, Y. Liu, X. Cen, B. Chen, W. Li, Exploiting the synergic strengthening effects of stacking faults in carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites for enhanced mechanical properties, *Composites Part B: Engineering*, 211(108646), 2021.