

Experimental Investigation of Effects of Annealing Process on Formability and Microstructure of Al 2024-T3 Sheet Metal Material

İbrahim KARAAĞAÇ¹ , Mehmet Okan KABAKÇI^{2,*} , Mehmet Yasin DEMİREL³ 

^{1,2} Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

³ Graduate School of Natural And Applied Sciences, Gazi University, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 22/10/2019

Revision: 01/02/2020

Accepted: 08/02/2020

Highlights

- Precipitation formation
- Grain growth
- Mechanical properties

Keywords

Al2024-T3

Annealing

Formability

Mechanical Properties

Microstructure

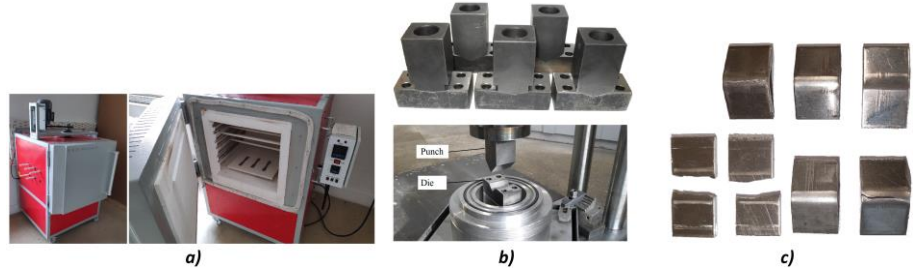


Figure A. Annealing furnace (a); Forming Dies (b); Forming Results (c)

Purpose: In this study, the effects of annealing parameters such as annealing temperature and time on Al2024-T3 material's microstructure and formability have been investigated experimentally. In addition to it was aimed to determine the annealing parameters that can be used for the most accurate forming process where forming defects such as cracks and breaks do not occur.

Theory and Methods: 2.5 mm of AL2024-T3 sheet material thick was used as test material. V-Bending test and tensile test specimens were prepared. The test specimens were annealed at different temperatures (100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C) and times (6 min, 30 min, 60 min). Microstructural properties of annealed test specimens were investigated by the SEM method. Formability studies were carried out by using 15, 30, 45, 60, 75 degrees-bending dies which have different die angles.

Results: Forming defects such as scratches, cracks or breaks weren't seen on the annealed product. It was observed that the increase of annealing temperature caused an increase in the amount of precipitate in the material structure and the growth of grain boundaries. Besides, it has been observed that by increasing the annealing temperature, the number of precipitates in the microstructure of the material and the size of the precipitate increase.

Conclusion: It has been determined that the formability of Al2024-T3 were increased and the forming defects were decreased with increasing annealing temperature and time. It has seen that due to annealing process, the precipitation formations have occurred in the microstructure. On the other hand, it has been seen that the hardness and strength of material were decreased due to precipitate formations and grain growth.



Tavlama İşleminin Al 2024-T3 Sac Malzemesinin Şekillendirilebilirliğine ve Mikroyapıya Etkilerinin Deneysel Araştırılması

İbrahim KARAAĞAÇ¹ , Mehmet Okan KABAKÇI^{2,*} , Mehmet Yasin DEMİREL³ 

^{1,2} Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği, 06500, Yenimahalle/ANKARA

³ Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada, farklı tavlama parametrelerinde gerçekleştirilen tavlama işleminin Al2024-T3 sac malzemesinin bükme ile şekillendirilebilirlik ve mikroyapısında meydana getirdiği değişimler araştırılmıştır. Al2024-T3 sac malzemesine uygulanan tavlama işlemleri; Oda sıcaklığı – 100 °C – 200 °C – 300 °C – 400 °C tavlama sıcaklıklarında ve 6 dk – 30 dk – 60 dk tavlama sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemleri, 15° - 30° - 45° - 60° - 75°'lik farklı açılara sahip V bükme kalıplarında yapılmıştır. 15° açılı V bükme kalıbında bükülen tüm numunelerin tüm parametrelerde başarılı bir şekilde şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 60° ve 75° açılı V bükme kalıplarında ise sadece 400 °C – 30 dk ve 400 °C – 60 dk tavlama parametrelerinde ısıl işlem uygulanmış deney numunelerinin başarılı olarak şekillendirilebildiği tespit edilmiştir. Tavlama işlemi sonucunda malzemenin mikroyapısında çökelti oluşumları gözlemlenmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/10/2019
Düzeltilme: 01/02/2020
Kabul: 08/02/2020

Anahtar Kelimeler

Al2024-T3
Tavlama
Şekillendirilebilirlik
Mekanik Özellikler
Mikroyapı

Experimental Investigation of Effects of Annealing Process on Formability and Material Properties of Al 2024-T3 Sheet Metal Material

Keywords

Al2024-T3
Annealing
Formability
Mechanical Properties
Microstructure

Abstract

In this study, the effects of annealing process that is performed in different annealing parameters on bending formability of Al2024-T3 sheet material were investigated. The effects of annealing process on microstructure were also investigated. Annealing processes were carried out at RT, 200, 300, and 400 °C annealing temperatures and for 6, 30 and 60 min annealing times. Forming processes were performed with 15° - 30° - 45° - 60° - 75° V bending dies. It was observed that all specimens bent in V bending die with 15° angle were successfully formed in all annealing parameters. Moreover, it has been observed that in only 400 °C - 30 min and 400 °C - 60 min annealed test specimens were formed successfully in V bending dies with 60° and 75° die angles. As a result of the annealing process, precipitation formations were observed in the microstructure of the material.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal yaşamın korunması ve çevreye salınan sera gazlarının olumsuz etkilerine ilişkin endişeler, taşımacılık endüstrisini ürettikleri araçların ağırlık miktarını azaltmaya yöneltmektedir. Bu gereklilik ise hafif metallere alüminyum ve magnezyumun yaygın kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Alüminyum 2024 alaşımları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi korozyon direnci ve kompozitlere kıyasla daha düşük maliyetlerinin bulunması gibi sebeplerden dolayı başta otomotiv, uzay-havacılık sanayi olmak üzere pek çok endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, sahip oldukları yüksek mukavemet ve düşük süneklik özelliklerinden dolayı Alüminyum 2024 alaşımlarının oda sıcaklığında şekillendirilebilirlikleri kısıtlıdır. Bu durum, şekillendirme operasyonlarında istenen geometrinin çatlama veya kırılma gibi şekillendirme kusurları meydana gelmeden elde edilebilmesini zorlaştırmaktadır. Al2024 alaşımlarında şekillendirilebilirliği artırarak oluşan kusurların engellenmesi amacıyla şekillendirme işlemi öncesinde ya da şekillendirme operasyonu esnasında çeşitli ısıl işlem uygulamaları gerekli olabilmektedir [1-4]. Sıklıkla kullanılan bu ısıl işlem uygulamalarından bir tanesi de çözeltiye alma ısıl işlemidir. Çözeltiye

alma ısıl işlemi sırasıyla; fazların çözündüğü çözeltiliye alma, aşırı doymuş yapıların oluştuğu su verme ve oda sıcaklığında ya da denge solvüs eğrisinin altında kalan bir sıcaklıkta çözülmüş olan atomların çöktüğü yaşlandırma işlemlerinden meydana gelmektedir. T3 ısıl işlemi ise; literatürde çözeltiliye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma ile kararlı yapıya getirilmiş olarak tanımlanmaktadır [5-6]. Literatürde, şekillendirme operasyonları öncesinde uygulanan ısıl işlemler haricinde şekillendirme operasyonları sırasında şekillendirilebilirliği bir miktar daha arttırabilmek amacıyla indüksiyon ya da lazer uygulamalarıyla şekillendirilecek alanın bölgesel ısıtılması veya bütün parçanın ısıtılması; şekillendirme yapılacak kalıp setinin tamamının ya da sadece bir kalıp yarımının ısıtılması gibi çeşitli çalışmaların gerçekleştirildiği belirlenmiştir [7-16]. Moy v.d. [7] ısıl işlemin 2024-T3 alüminyum alaşımının dokusu, mikroyapısı ve şekillendirilebilirliği üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar için kullanılan 1.27 mm ve 2.03 mm kalınlığındaki Al2024-T3 sac malzemelere 525 °C sıcaklıkta çözeltiliye alma ve 150 °C sıcaklıkta 2.5 saat, 2 gün ve 1 haftalık değişen sürelerde yaşlandırma sertleştirme uygulamışlardır. Tavlanan numunelere uyguladıkları çeşitli testler sonucunda; 150 °C sıcaklık ve 2 gün boyunca yaşlandırılan sac numunelerin mekanik özelliklerinde bir miktar azalmanın ve buna bağlı olarak da yüzde uzamanın % 4–6 oranında arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, bu yaşlandırma işlemlerinin sac malzemenin şekillendirilebilirliğini arttırdığını da gözlemlemişlerdir. Ortiz v.d. [8] Al2024 alaşımının da dahil olduğu çeşitli alüminyum malzemelerin çekme özelliklerine soğuk işlemin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, çeşitli temperlerde tavlama işlemi uygulamışlar ve daha sonrasında uzama sınırlarını görmek için malzemeleri plastik deformasyona maruz bırakmışlardır. Şekillendirme işlemi sonunda malzemelerin çekme dayanımları, sertlikleri, süneklikleri, tane boyutları ve iletkenlikleri gibi çeşitli özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ise; malzemelere yüksek süneklik ve düşük dayanım kazandıran ısıl işlemlerin uygulanması ile gerçekleştirilecek şekillendirme işlemlerinin daha başarılı olacağını belirtmişlerdir. Khan v.d. [9] Al2024 alaşımının şekillendirilebilirliğine proses parametrelerinin etkilerini sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Çalışmalarında, öncelikle sonlu elemanlar analizleri ile malzemenin şekillendirilebilirliği için uygun parametreler belirlenmiş ve daha sonrasında konvansiyonel pres tezgahı kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda ise ara tavlamanın şekillendirilebilirliği %10 iyileştirdiğini, sünekliği %50-60 oranında arttırıp çekme dayanımını ise %50-60 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu alaşımın şekillendirme operasyonlarında tavlama (T-O) temper kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Dilmeç ve Arıkan [10] optimum çözeltili ısıl işlem koşullarını belirlemek için tavlama parametrelerinin AA2024 sac malzemesinin mekanik özelliklerine ve şekillendirilebilirliğine etkilerini inceledikleri bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. 175 mm çapında ve 1 mm kalınlığında ki deney numunelerini farklı sıcaklık (485 °C, 493 °C ve 505 °C), bekletme süresi (15 dk, 30 dk ve 45 dk) ve ısıtma oranı (250 °C/s, 750 °C/s ve 2500 °C/s) parametrelerinde tavlama işlemine tabii tutmuşlardır. Tüm tavlama koşullarında tavlama numunelerin çekme testleri ile mekanik özelliklerini ve limit dome testi ile şekillendirilebilirliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar neticesinde varyans analiz metodu (ANOVA) ile en uygun tavlama parametrelerini belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda; ısıtma oranının bu çalışma için neredeyse hiçbir etkisinin olmadığını ancak tavlama sıcaklığının bu çalışma için en etkili parametre olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 493 °C ve 30 dk parametrelerinde çözeltili ısıl işlemi uygulanan AA2024 numunelerin en yüksek akma dayanımı, çekme dayanımı ve şekillendirilebilirlik sınırına sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Reis v.d. [11] yapay yaşlandırma işleminin Al2024 alaşımının mekanik özelliklerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. 495 °C, 505 °C ve 515 °C sıcaklıkta çözeltiliye alınıp daha sonrasında su verilen numuneler 190 °C ve 208 °C sıcaklıkta yapay yaşlandırmaya bırakılmışlardır. Isıl işlemler ile yapısı düzenlenen sac malzemeler çeşitli mekanik testlere tabii tutulmuşlardır. Yapılan testler sonucunda; 505 °C sıcaklıkta solüsyona alınıp 208 °C sıcaklıkta iki saat boyunca yaşlandırılan numunelerin en yüksek sertlik değerine sahip olduğu, 515 °C sıcaklıkta solüsyona alınarak 208 °C sıcaklıkta iki saat süreyle yaşlandırılan numunelerin ise en yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Fujda v.d. [12] çözeltiliye alma ısıl işleminde sıcaklığın Al2024 alaşımının mikro yapısal ve mekanik özelliklerine etkilerini metalografik çalışmalar, Vickers sertlik ölçüm testleri ve çekme testleriyle deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan ısıl işlem adımları; 500 °C – 570 °C arasında değişen sıcaklıklarda çözeltiliye alma, 2.5 saat vakumlama, su ile soğutma ve 300 saat boyunca doğal yaşlandırma şeklindedir. Yapılan ölçümler sonucunda, tavlama sıcaklığının arttırılmasıyla sac malzemenin sertliğinin düştüğünü ve mekanik dayanımının azaldığını, ek olarak şekillendirilebilirliğin arttığını gözlemlemişlerdir. Mohammadi v.d. [13] alüminyum 2024-T3 sac malzemesinin bölgesel olarak lazer kullanılarak ısıtılması ve lokal yumuşama sonrasında bükme ile şekillendirilebilirliğini, ısıtma

uygulanmadan şekillendirilen numuneler ile karşılaştırdıkları deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bükülecek deney numuneleri, Nd:YANG lazeriyle çeşitli ısıtma rotaları izlenerek bölgesel bir yumuşamaya maruz bırakılmıştır. Bölgesel yumuşamalar sonucunda büküm çizgisi etrafında biriken gerilmelerin azaldığı ve şekillendirilebilirliğin daha doğru ölçü tamlığında gerçekleştirilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kullandıkları üç aşamalı bir lazer tarama stratejisiyle geri esnemeyi büküm radyüsünü değiştirmeden %43 oranında azalttıklarını belirtmişlerdir. Merklein v.d. [14] bölgesel olarak lazer ile ısıtılan alüminyum alaşımlarının özelliklerinin yeniden düzenlenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, deney numunelerine 5 saniyeden daha az tutma sürelerinde ve 400 °C sıcaklıklarda kısa süreli ısıtma işlemi uygulamışlardır. Isıtma uygulanmadan önce en fazla 30° büküm açısında çatlamadan şekillendirilebilen dikdörtgen kesitli bir profil parçanın bölgesel olarak ısıtıldıktan sonra %73 daha fazla şekillendirilebilirlik göstererek 52° büküm açısına ulaşabildiği ve malzemelerin mekanik özelliklerinde %80 oranına varan azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Chen v.d. [15] ısıtma işlemi uygulanabilen ve yüksek mukavemetli 2024 alüminyum alaşımlarına senkron soğutmalı sıcak şekillendirme yöntemi uygulamalarını ve bu işlemin malzemenin mekanik özelliklerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca malzemelerin mekanik malzemenin mikroyapısında meydana gelen değişimleri de incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, şekillendirme sonrasında geri esnemeye neden olan artık gerilmelerin senkron soğutmalı sıcak şekillendirme yöntemiyle azaltılabildiği ve kalıptan çıkarılan ürünün boyutsal doğruluğunu olumlu etkilediğini gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan testler sonucunda akma dayanımının 317.5 MPa ve çekme dayanımının ise 476.1 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Maneo v.d. [16] hızlı ısıtmayla yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarından oluşan uçak parçalarının sıcak şekillendirilebilmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 630 °C sıcaklıktaki fırında 30 saniye ısıtılarak 450 °C sıcaklığa ulaştırılan deney numuneleri fırından alınıp 5 saniye içerisinde deney düzeneğine yerleştirilmiş ve 400 °C sıcaklıkta şekillendirme işlemi gerçekleştirmiştir. Yapılan şekillendirme deneyleri sonucunda, ılık şekillendirme operasyonlarının soğuk şekillendirme operasyonlarına kıyasla daha olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Fan v.d. [17] Al2024 alaşımı sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kalıp yarımlarında sıcak şekillendirilmesi sonucu mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri yaptıkları deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Çalışmada, 498 °C sıcaklıkta 30 dakika çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanan deney numuneleri soğumadan kalıba yerleştirilmiş ve şekillendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; üst kalıp yarımının soğuk olmasının etkili bir su verme işlemini gerçekleştirilebilmesini sağlayarak parçanın termal bozulmasını azalttığını ve alt kalıbın sıcak olmasının ısıtılmış olan sac malzemenin hızlı soğumasını engelleyerek daha iyi dayanım değerlerinin elde edilebilmesine imkan verdiğini gözlemlenmiştir. Ayrıca, şekillendirme işlemlerinin çözeltiye alma sıcaklığına yakın sıcaklıklardaki kalıplarda gerçekleştirilmesi ile şekillendirilebilirlik miktarının geliştirilebileceğini belirtmişlerdir. Literatürde, gerçekleştirilen çalışmalarda uygulanan yöntemlerin yüksek maliyetli ve uzun zaman alıcı süreçler gerektirdiği gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmaların daha çok Al2024 malzemeye uygulanan ısıtma işlemlerinin mikro yapı ve mekanik özelliklerdeki değişimlere odaklandığı, şekillendirilebilirliğin sınırlı sayıda incelediği tespit edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada, Al2024-T3 alüminyum sac malzemesine çeşitli sıcaklık ve bekletme süreleri parametrelerinden oluşan farklı tavlama işlemlerinin uygulanması sonucu malzemenin mikro yapısında meydana gelen değişimlerin ve V bükme ile şekillendirilebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçların endüstriyel alanda yapılan çalışmalar için kullanılabilecek bir yol gösterici olması amaçlanmıştır.

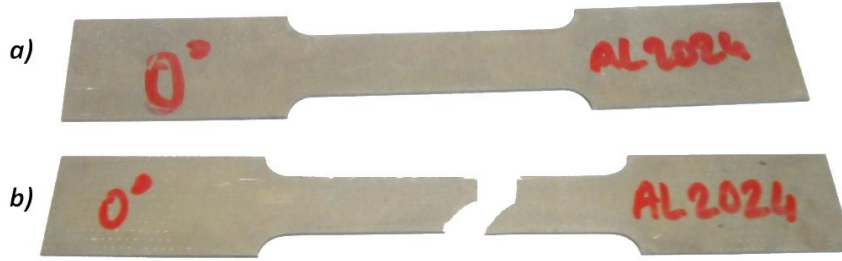
2. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

Tavlama işleminin mikro yapı ve şekillendirilebilirliğe etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada; çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma ile kararlı yapıya getirilmiş 2.5 mm kalınlığında Al2024-T3 alüminyum alaşım sac malzeme kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle endüstriden hazır temin edilmiş sac levha malzemenin kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için kimyasal spektrometre cihazıyla ölçümler yapılmıştır. Al2024-T3 malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Al2024-T3 sac malzemesinin kimyasal kompozisyonu (%wt)

Malzeme	% Al	% Cu	% Mn	% Zn	% Fe	% Ni	% Zr	% Pb	% Diğer
Al2024-T3	93,810	4,376	0,427	0,140	0,101	0,009	0,006	0,002	0,129

Kimyasal bileşimi belirlenen sac malzemelerden mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılmak amacıyla 0° hadde yönünde ASTM-E8M standardında çekme test numuneleri tel erezyon tezgahında kesilerek hazırlanmıştır. Tel erezyon tezgahında kesilerek hazırlanan çekme test numunelerinin test öncesi ve sonrasına ait görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir.

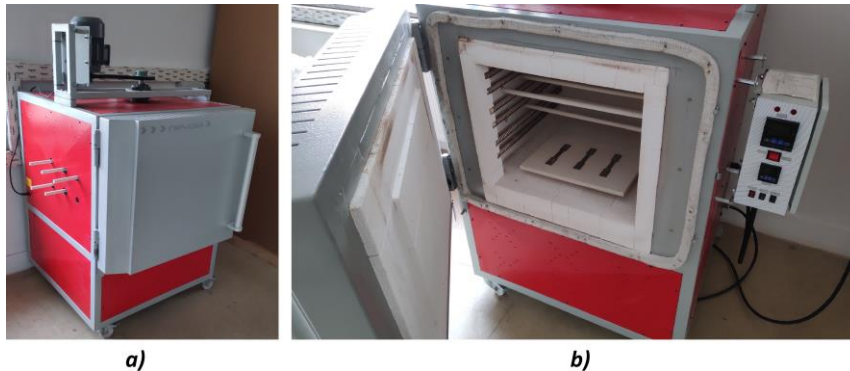


Şekil 1. Al2024-T3 sac malzemesi çekme test numuneleri (a) Çekme deneyi öncesi; (b) Çekme deneyi sonrası

Ayrıca, mikroyapı ve şekillendirilebilirlik incelemelerinde kullanılmak amacıyla 20 mm x 40 mm ölçülerinde ve 0° hadde yönündeki deney numuneleri giyotin makas kullanılarak hazırlanmıştır. Giyotin makas ile hazırlanan deney numuneleri ve tel erezyon tezgahında hazırlanan çekme test numuneleri PID kontrollü bir fırında birlikte tavlama işlemine tabii tutulmuşlardır.

2.1. Tavlama İşlemi ve Tavlama Parametreleri (Annealing Process and Annealing Parameters)

Çekme deneylerinde kullanılacak olan çekme testi numuneleri ile mikroyapı ve şekillendirilebilirlik deneylerinde kullanılacak deney numunelerine çeşitli tavlama sıcaklıklarında (100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C) ve çeşitli tavlama sıcaklığında bekleme sürelerinde (6 dk., 30 dk., 60 dk.) tavlama işlemi uygulanmıştır. Literatürde, 1 inch (25.4 mm) parça kalınlığı için 1 saat süreyle tavlama sıcaklığında bekleme işlemi uygulandığı belirlenmiştir [18]. Yapılan bu deneysel çalışmada kullanılan sac malzemenin 2.5 mm kalınlığında olması nedeni ile tavlama sıcaklığında bekleme süresinin 6 dk. olması gerektiği belirlenmiştir. Tavlama sıcaklığında bekleme süresinin etkilerinin daha iyi gözlemlenmesi amacıyla 30 dk. ve 60 dk. tavlama süreleri de çalışmaya dahil edilmiştir. Tavlama işlemi; tavlama fırının bir saat içinde istenen sıcaklığa ulaşması, belirlenen tavlama sıcaklığında bekleme süresince herhangi bir sıcaklık değişimi olmaması ve fırın kapağı kapalı şekilde oda sıcaklığına kadar soğutulması adımlarından meydana gelmektedir. Tavlama işleminin gerçekleştirildiği fırın ve fırın içindeki deney numunelerinin yerleşimi Şekil 2’de verilmiştir.



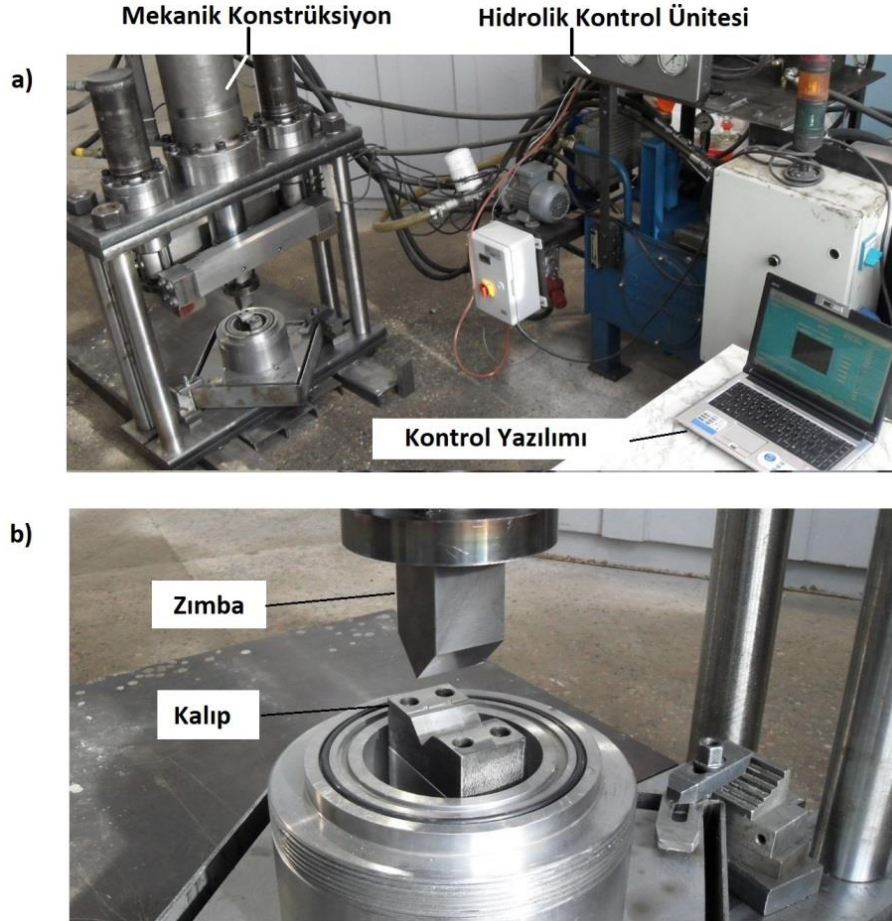
Şekil 2. Tavlama İşlemi Ortamı (a) Tavlama Fırını; (b) Malzemelerin Tavlama Fırınına Yerleşimi

2.2. Mikroyapı İncelemesi (Investigation of Microstructure)

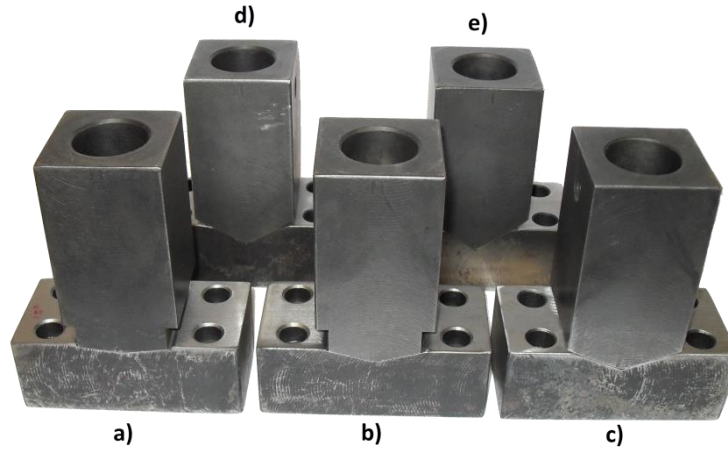
Tavlama prosesinin Al2024-T3 sac malzemesinin mikroyapısında meydana getirdiği değişimler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir. Mikroyapı incelemesi; zımparalama, parlatma, ultrasonik banyoda temizleme ve kimyasal bir karışım ile dağlanması aşamalarından oluşmaktadır. Yapılan mikroyapı incelemesi ön hazırlığında dağlayıcı olarak; %1 HF (Hidroflorik Asit), %1.5 HCl (Hidroklorik Asit), %2.5 HNO₃ (Nitrik Asit) ve %95 H₂O'dan oluşan Keller Dağlayıcısı kullanılmıştır.

2.3. Şekillendirme Deney Seti ve Deney Parametreleri

Tavlanan deney numunelerinin şekillendirme işlemleri bilgisayar kontrollü bir deney düzeneğine bağlanan farklı açılı V bükme kalıplarında gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar kontrollü deney düzeneği ile şekillendirme işlemlerinin gerçekleştirildiği ortam Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekillendirme işlemleri 10 mm/sn sabit deformasyon hızında, uç radyüsü 0 (sıfır) olan zımbalar ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75° büküm açısına sahip kalıplar kullanılarak ütüleme işlemi uygulanmadan gerçekleştirilmiştir. Büküm işlemlerinde kullanılan kalıplar Şekil 4'te verilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında meydana gelen zamana bağlı kuvvet değişimleri, deney seti üzerine bağlı olan yük hücrelerinden elde edilen veriler ile anlık gözlemlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Yapılan çalışmada; deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlanan tekrarlanabilirliğinin doğrulanması amacıyla tüm deneyler en az iki defa tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Şekillendirme Ortamı Görünüşü (a) Şekillendirme Cihazı; (b) Kalıp – Zimba Setinin Detay Görünüşü



Şekil 4. Şekillendirme Kalıpları (a) 15°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°

3. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA (EXPERIMENTAL INVESTIGATION and DISCUSSION)

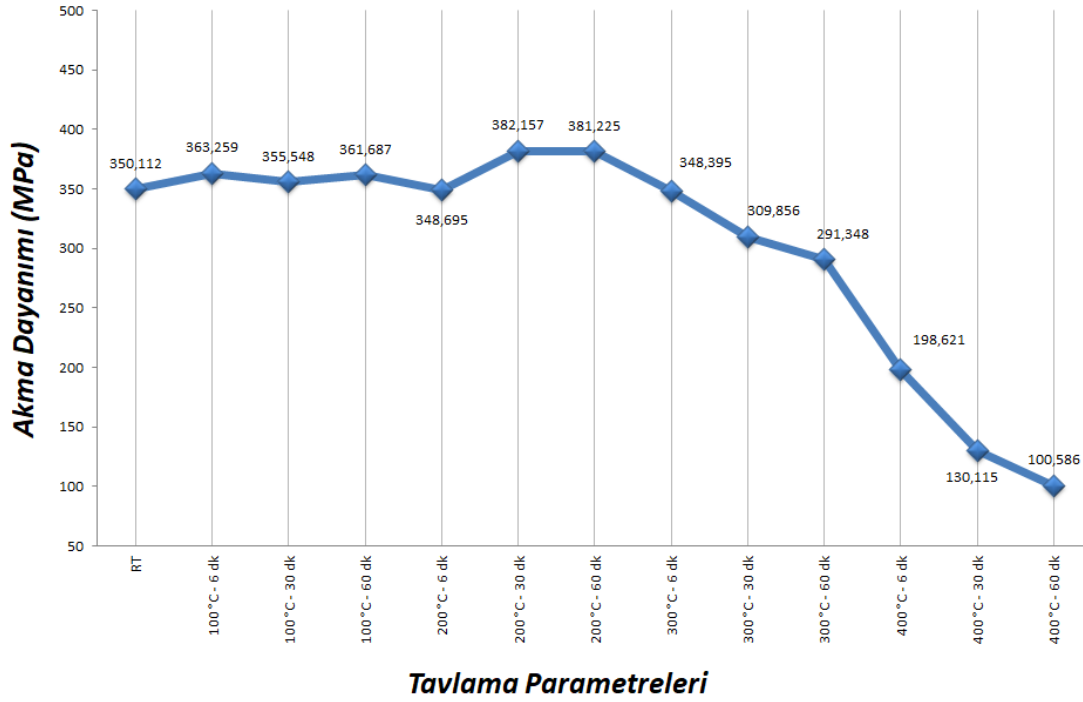
Al2024-T3 alüminyum alaşımı sac levha malzemeden elde edilen deney numuneleri ve çekme testi numuneleri 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C tavlama sıcaklıklarında 6 dk, 30 dk, 60 dk tavlama sürelerinde elektronik kontrollü fırın kullanılarak tavlansmıştır. Çeşitli tavlama sıcaklıklarında ve tavlama sürelerinde ısıl işlem uygulanan numunelerin 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° açılı V bükme kalıplarında bükülmesi ile şekillendirilebilirlikleri ve tavlama parametrelerinin, numunelerin mikroyapısında meydana getirdiği değişimler de yorumlanmıştır. Yapılan bükme ile şekillendirme işlemleri sonucunda elde edilen şekillendirilebilirlik sonuçları da Şekil 5'te verilmiştir.

15° büküm açısına sahip kalıp kullanılarak gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri tüm tavlama parametreleri için başarılı sonuçlanmıştır. 30° büküm açısına sahip kalıp kullanılarak gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri ise 300 °C haricindeki tüm tavlama parametrelerinde başarılı sonuçlanırken; 300 °C sıcaklıkta tavlanan numunelerde çatlamlar meydana gelmiştir. Ancak, 45° büküm açısına sahip kalıp kullanılarak gerçekleştirilen şekillendirme işlemlerinde ise sadece 400 °C'de tavlanan numuneler için başarılı sonuç verirken diğer sıcaklıklarda tavlanan numunelerin çatladığı gözlemlenmiştir. 60° ve 75° büküm açılarında sahip kalıplar kullanılarak uygulanan şekillendirme çalışmalarında ise yalnızca 400 °C – 30dk. ve 400 °C – 60dk. tavlama parametreleri için şekillendirme kusuru meydana gelmeksizin gerçekleştirilebilmiştir. 30° ve 60° kalıp açılarında yapılan bükme işlemlerinde elde edilen sonuçların literatürde elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [22].

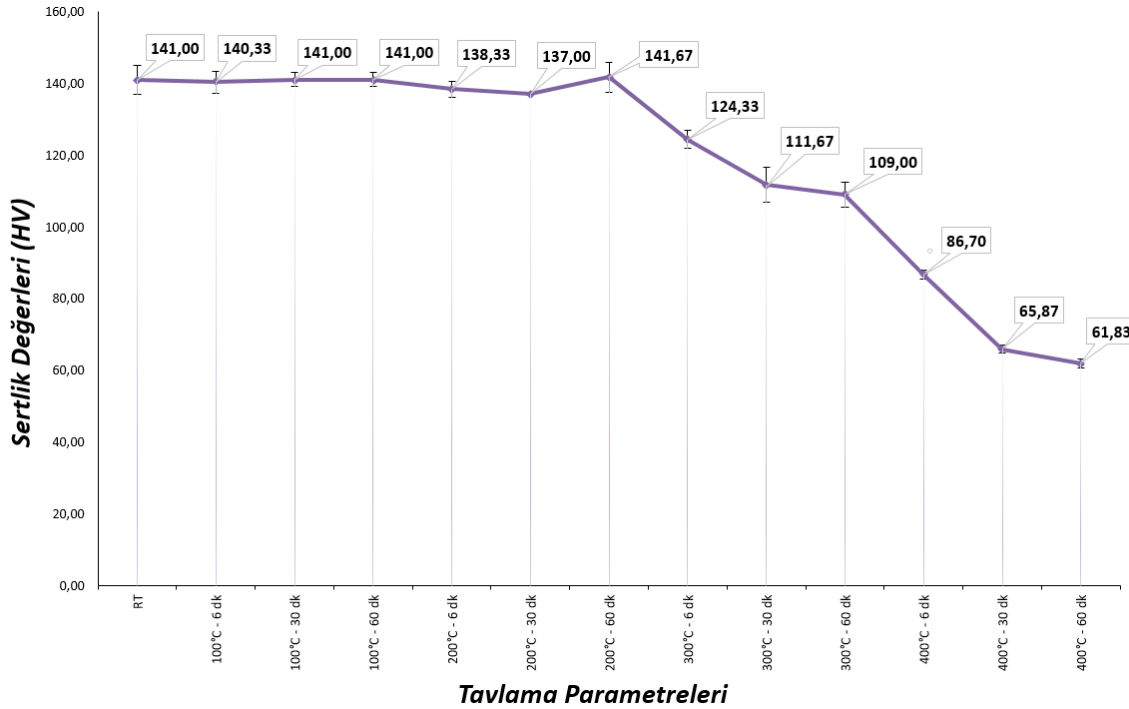
Kalıp Açısı	Tavlama Sıcaklığı	Tavlama Süresi	Sonuç	Kalıp Açısı	Tavlama Sıcaklığı	Tavlama Süresi	Sonuç		
15°	RT	-	Şekillendirildi	60°	RT	-	Şekillendirilemedi		
		100 °C	6			Şekillendirildi	100 °C	6	Şekillendirilemedi
			30			Şekillendirildi		30	Şekillendirilemedi
	60		Şekillendirildi		60	Şekillendirilemedi			
	200 °C	6	Şekillendirildi		200 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirildi			60	Şekillendirilemedi		
	300 °C	6	Şekillendirildi		300 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirildi			60	Şekillendirilemedi		
	400 °C	6	Şekillendirildi		400 °C	6	Şekillendirildi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirildi		
60		Şekillendirildi	60	Şekillendirildi					
30°	RT	-	Şekillendirildi	75°	RT	-	Şekillendirilemedi		
		100 °C	6			Şekillendirildi	100 °C	6	Şekillendirilemedi
			30			Şekillendirildi		30	Şekillendirilemedi
	60		Şekillendirildi		60	Şekillendirilemedi			
	200 °C	6	Şekillendirildi		200 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirildi			60	Şekillendirilemedi		
	300 °C	6	Şekillendirilemedi		300 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirilemedi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirilemedi			60	Şekillendirilemedi		
	400 °C	6	Şekillendirildi		400 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirildi		
60		Şekillendirildi	60	Şekillendirildi					
45°	RT	-	Şekillendirilemedi		RT	-	Şekillendirilemedi		
		100 °C	6			Şekillendirilemedi	100 °C	6	Şekillendirilemedi
			30			Şekillendirilemedi		30	Şekillendirilemedi
	60		Şekillendirilemedi		60	Şekillendirilemedi			
	200 °C	6	Şekillendirilemedi		200 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirilemedi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirilemedi			60	Şekillendirilemedi		
	300 °C	6	Şekillendirilemedi		300 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirilemedi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirilemedi			60	Şekillendirilemedi		
	400 °C	6	Şekillendirildi		400 °C	6	Şekillendirildi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirildi		
60		Şekillendirildi	60	Şekillendirildi					

Şekil 5. Şekillendirme İşlemlerinden Elde Edilen Veriler

Tavlama deney numunelerinin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler sertlik ölçme ve çekme testi gibi mekanik testlerde de literatürde gözlemlenmiştir. Çekme test sonuçlarından tavlama işleminin mekanik özelliklerindeki değişimlere etkileri, çekme testi deneyleri sonucunda elde edilen akma dayanımı verileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca, sertlik ölçüm testleri sonucu elde edilen veriler Şekil 7'de gösterilmiştir [22]. Uygulanan tavlama işlemlerinde artan sıcaklığın ve tutma süresinin etkisi ile malzemenin tane sınırları ergimeye başlamaktadır. Bu duruma bağlı olarak malzemenin dayanım ve sertlik değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir [19-20]. Oda sıcaklığı durumunda 350 MPa akma dayanımına ve 141 HV sertlik değerine sahip olan numuneler de 200 °C – 60dk tavlama parametrelerine kadar anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Ancak bu tavlama parametresinden sonra akma dayanımında ve sertlik değerlerinde önemli azalmaların meydana geldiği belirlenmiştir. 400 °C – 60dk tavlama parametreleri uygulandığında ise akma dayanımının yaklaşık %71, sertlik değerinin ise yaklaşık %56 oranında azaldığı gözlemlenmiştir [22].



Şekil 6. Farklı parametrelerde tavllanmış Al2024-T3 malzemelerin akma dayanımları [22]

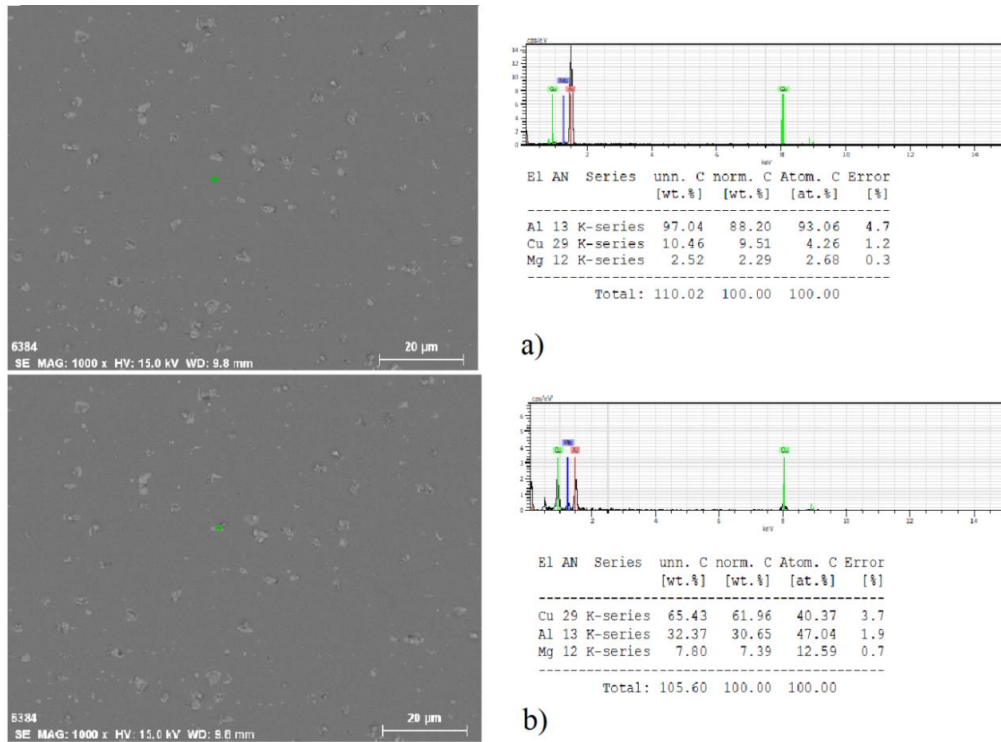


Şekil 7. Farklı parametrelerde tavllanmış Al2024-T3 malzemelerin sertlik değerleri [22]

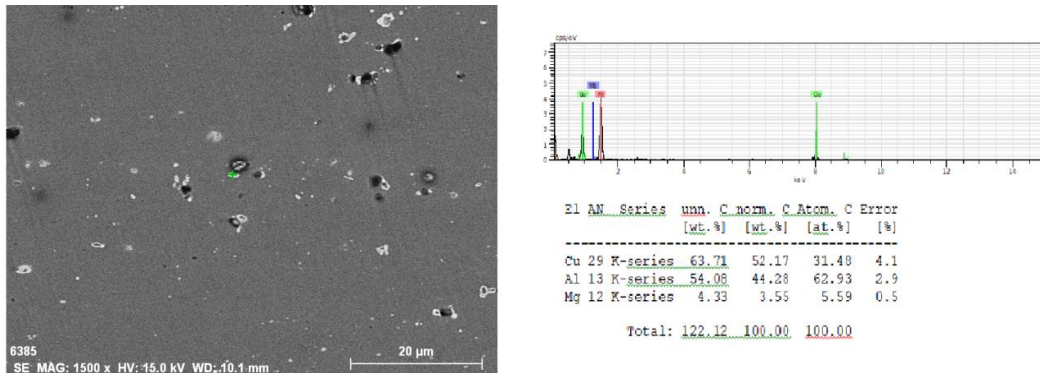
Çeşitli tavlama sıcaklıklarında ve sürelerinde tavlanan deney numunelerinin mikroyapı özelliklerinde meydana gelen değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Yapılan mikroyapı incelemesi sonucunda, uygulanan tavlama sıcaklığı artışının malzeme yapısındaki çökelti miktarında artışa ve tane sınırlarının büyümesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, tavlama sıcaklığında bekletme süresinin artması ile de malzemenin iç yapısındaki çökeltilerin sayısının ve çökelti boyutlarının artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılma işlemleri genel olarak; çökeltilerin çözündürülerek aşırı doymuş katı çözeltinin (Supersaturated Solid Solution:

SSSS) oluşumu, Guiner-Preston bölgelerinin oluşumu, yarı kararlı yarıkararlı fazın oluşumu ve kararlı fazın oluşumu şeklinde tanımlanmaktadır. Bir Al-Cu-Mg alaşımı olan Al2024 için ise bu dizi SSSS \rightarrow GP \rightarrow θ' \rightarrow θ' ($CuAl_2$) şeklinde gösterilebilmektedir. Artan sıcaklık değerleriyle $CuAl_2$ çözünürlüğü giderek artmaktadır ve alaşım aşırı yaşlandırıldığında yarıkararlı çökeltiler hızla büyüyerek kararlı ikincil fazlar oluşmaktadır [20]. Mikroyapıda meydana gelen bu değişiklikler malzemenin dayanım değerlerinde önemli oranda azalmaların oluşmasına neden olmuştur. SEM analizi ile elde edilen veriler Şekil 8 – 11 ile gösterilmiştir.

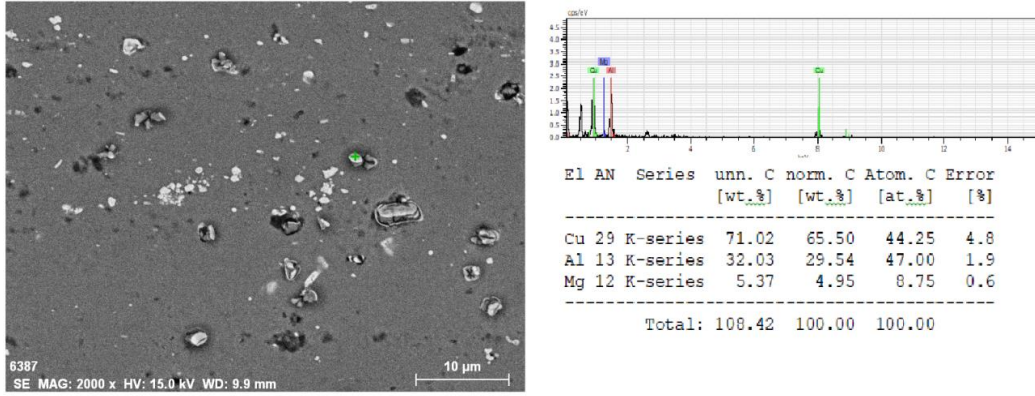
Artan sıcaklıkla birlikte oda sıcaklığında ana metalde %88,20 olan Al, %9,51 olan Cu ve %2,29 olan Mg miktarı, 200 °C'de %44,28 Al, %52,17 Cu ve %3,55 Mg; 300 °C'de %29,54 Al, %65,50 Cu ve % 4,95 Mg ve 400 °C'de %41,05 Al, %46,57 Cu ve %12,38 Mg olarak değişmiştir. Yapılan SEM görüntüleme analizleri sonucunda, tavlama sıcaklığının ve tavlama sıcaklığında bekletme süresinin artması ile birlikte malzeme yapısındaki tanelerin büyüdüğü ve tane sınırlarının genişlediği gözlemlenmiştir. Tane büyümesine bağlı olarak da mekanik özelliklerin azaldığı ve şekillendirilebilirliğin arttığı tespit edilmiştir.



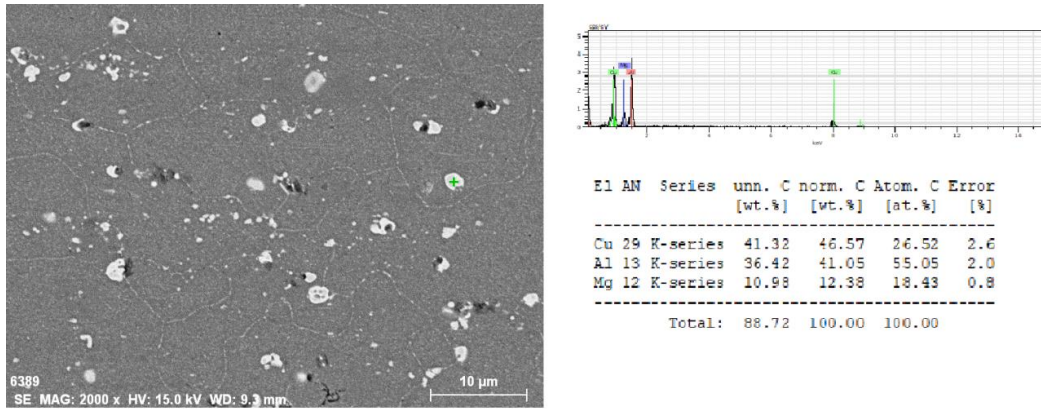
Şekil 8. Oda sıcaklığında mikroyapı incelemesi (a) Ana metal; (b) Tanecik/Çökelti



Şekil 9. 200 °C – 60 dk. tavlama parametrelerinde tanecik/çökelti incelemesi



Şekil 10. 300 °C – 60 dk. tavlama parametrelerinde tanecik/çökelti incelemesi



Şekil 11. 400 °C – 60 dk. tavlama parametrelerinde tanecik/çökelti incelemesi

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Al2024 – T3 sac malzemesinin çeşitli sıcaklıklarda tavllanması sonucu malzemenin şekillendirilebilirlik ve mikroyapı özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Çatlamlar ve kırılmalar gibi şekillendirme kusurlarının oluşmadığı en doğru şekillendirme işlemi için kullanılacak tavlama parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler aşağıda verilmiştir.

- I. Tavlama işlemi uygulanmamış oda sıcaklığında ve 100 – 200 °C’de tavlanan deney numunelerinin sadece 15° ve 30° büküm açısına sahip deney numunelerinde kırılma veya çatlama gibi herhangi bir şekillendirme kusuru meydana gelmeden şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Ancak, tavlama sıcaklığının ve tavlama sıcaklığında bekleme süresinin artırılması ile malzemenin mikroyapısında meydana gelen çökelti oluşumları sayesinde alaşımın mekanik özelliklerinde belirgin azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 400 °C – 30 dk. ve 400 °C – 60 dk. parametrelerinde tavlanan numunelerin tüm şekillendirme açılarında herhangi bir şekillendirme kusuru oluşmaksızın şekillendirilebildiği ancak 400 °C – 6 dk parametrelerinde işlem gören numunelerin ise 60° ve 75° açılı kalıplarda başarılı olarak şekillendirilemediği gözlemlenmiştir.
- II. Tavlama sıcaklığının artması ve tavlama sıcaklığında bekleme süresinin artması ile malzemenin mikroyapısında ki çökeltilerin sayıca arttığı ve çökelti sınırlarının giderek genişlediği gözlemlenmiştir. Bu durum sonucunda malzemenin akma dayanımlarında ve sertliklerinde, özellikle 200 °C ve 60 dk. tavlama parametresinden sonra belirgin bir azalma olduğu yapılan mekanik testler ile belirlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. Zheng, K., Politis, D. J., Wang, L., & Lin, J. (2018). A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex—shaped aluminium panel components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(2), 55-80.
- [2] Vallellano, C., Morales, D., & Garcia-Lomas, F. J. (2008). A study to predict failure in biaxially stretched sheets of aluminum alloy 2024-T3. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(3), 303-310.
- [3] Wang, L., Strangwood, M., Balint, D., Lin, J., & Dean, T. A. (2011). Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2648-2656.
- [4] Şimşek, T., & Akkurt, A. (2019). Lazer ile AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzeyinin Kaplanması ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(2), 263-278.
- [5] Handbook, A. S. M. (1991). Heat treating. ASM international, 4.
- [6] Al-Saadi, H. I. A., & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525-532.
- [7] Moy, C. K. S., Weiss, M., Xia, J., Sha, G., Ringer, S. P. (2012). Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A* 552, pp.48–60.
- [8] Ortiz, D., Abdelshehid, M., Dalton, R., Soltero, J., Clark, R., Hahn, M., ... & Stoyanov, P. (2007). Effect of cold work on the tensile properties of 6061, 2024, and 7075 Al alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(5), 515-520.
- [9] Irfan Mahmood Khan M. I., Umair Ismail, D. Noman, M. Zeeshan Siddiqui and M. Shahzad (2017). Effect of Process Parameters on Formability of Aluminum 2024. *Journal of Space Technology*, Vol 7, No 1.
- [10] Dilmeç, M., & Arıkan, H. (2014). Effect of Solution Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties and Formability for AA 2024 Alloy. *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 686, pp. 3-9). Trans Tech Publications Ltd.
- [11] Reis, D. A., Couto, A. A., Domingues Jr, N. I., Hirschmann, A. C., Zepka, S., & de Moura Neto, C. (2012). Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024. *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 326, pp. 193-198). Trans Tech Publications.
- [12] Fujda, M., Mišičko, R., Rusňáková, L., & Sojko, M. (2007). Effect of solution annealing temperature on structure and mechanical properties of EN AW 2024 aluminium alloy. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 17(1).
- [13] Mohammadi, A., Vanhove, H., Van Bael, A., & Duflou, J. R. (2012). Bending properties of locally laser heat treated AA2024-T3 aluminium alloy. *Physics Procedia*, 39, 257-264.
- [14] Merklein, M., Böhm, W., & Lechner, M. (2012). Tailoring material properties of aluminum by local laser heat treatment. *Physics Procedia*, 39, 232-239.
- [15] Chen, G., Chen, M., Wang, N., & Sun, J. (2016). Hot forming process with synchronous cooling for AA2024 aluminum alloy and its application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(1-4), 133-139.
- [16] Maeno, T., Mori, K. I., & Yachi, R. (2017). Hot stamping of high-strength aluminium alloy aircraft parts using quick heating. *CIRP Annals*, 66(1), 269-272.

- [17] Fan, X., He, Z., Zheng, K., & Yuan, S. (2015). Strengthening behavior of Al–Cu–Mg alloy sheet in hot forming–quenching integrated process with cold–hot dies. *Materials & Design*, 83, 557-565.
- [18] LeMaster, R., Boggs, B., Bunn, J., Hubbard, C., & Watkins, T. (2007). Grinding induced changes in residual stresses of carburized gears. *Lateral*, 4(3), 42-47.
- [19] Demirel, M. Y., & Karaağaç, İ. (2019). 7075-T6 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Tavlama İşleminin Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Politeknik Dergisi*.
- [20] Dilmeç, M., Tınkır, M., & Arıkan, H. (2015). Al 2024 Alaşımının Çökelme Sertleşmesi İşlemi Koşullarının Şekillendirilebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 231-248.
- [21] Shan, D., & Zhen, L. (2012). Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes* (pp. 267-297). Woodhead Publishing.
- [22] Karaağaç, İ., Kabakci, M.O, & Demirel, M.Y. (2019). The Experimental Investigation of Annealing Parameters Effects on AL2024-T3 Materials' Formability and Mechanical Properties. *European Journal of Technique (EJT)*, 9(2), 338-346.