



Experimental investigation of the effects of annealing in Al7075-T6 sheet metal material on formability and springback

İbrahim Karaağaç¹ , Mehmet Okan Kabakçı^{1*} , Mehmet Yasin Demirel²

¹Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Ankara, Turkey

²Turkish Aerospace Industries – TUSAS, Ankara, Turkey

Highlights:

- Formability increased due to increasing annealing temperature and holding time
- Grain size and grain boundaries increased due to increasing annealing temperature and holding time
- Hardness decreased due to increasing grain size and boundaries

Graphical/Tabular Abstract

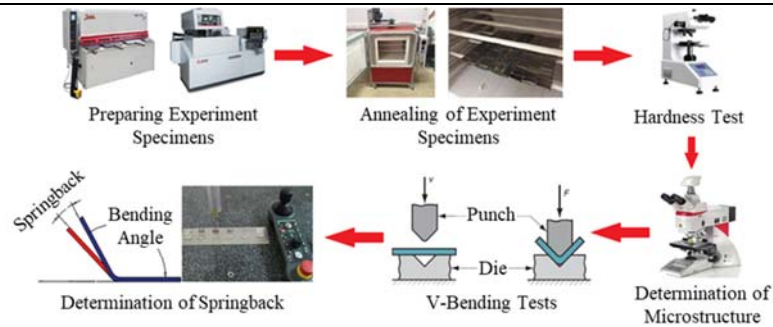


Figure A. Experimental investigation steps

Keywords:

- Spring-back
- Reverse Spring-back
- Annealing
- Al7075-T6

Article Info:

Research Article
Received: 14.11.2019
Accepted: 18.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.647009

Correspondence:

Author: Mehmet Okan Kabakçı
e-mail: mokabakci@gazi.edu.tr
phone: +90 312 202 8602

Purpose: Annealing processes used in literature to increase the formability of aluminum materials require consecutive metallurgical processes, which may be time consuming and not economical. In this study, it is aimed to investigate the spring-back behavior of Al7075 – T6 aluminum sheet metal material with V bending operations with different annealing temperature and holding time experimentally.

Theory and Methods:

In the experimental studies, a 3 mm thick Al7075-T6 sheet metal material was used. The experimental specimens were prepared in the rolling direction. The specimens were annealed at different annealing temperatures (100°C, 200°C, 300°C, 400°C) and different holding times (6 min, 30 min, 60 min). Mechanical properties of sheet metal materials were determined by tensile tests and Vickers hardness tests. Formability studies were applied by bending dies at different bending angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75°) and punches with a radius of 0 mm at a stable deformation velocity. Finally, after bending operations the spring-back values were determined by using CMM.

Results:

In bending operations, stress variations occur in the bending region, and the material tries to return to its original shape when the load is lifted. The angular change caused by this situation is defined as spring-back, which is a forming error in sheet metal forming processes that should be reduced as much as possible. It was observed that grain sizes increased due to the increase in annealing temperature. Also, grain growth decreased the hardness of the sheet metal material. As a result of the bending processes, it was observed that the formability can be increased and spring-back can be decreased with annealing processes applied at high temperatures. Finally, the 400 °C-30 min annealing parameters were selected for optimal bending operation.

Conclusion:

It has been determined that average hardness and strength values decreased with increasing annealing parameters and the amount of spring-back decreased by 80-90% due to this situation. The strength and hardness of Al7075-T6 alloy decreased due to increased annealing parameters. While the hardness at RT condition was measured 200,67 HV, the hardness at 400°C-60 min parameters was measured 62,90 HV. In RT conditions, Al7075-T6 sheet metal material was formed by V bending only at 15° angled die, cracking occurred in the bending region at 30° angled die and the specimens were broken in the bending region at 45°, 60°, 75° angled dies. It was determined that the annealing process applied at 400°C-60 min parameters resulted in optimal formability and minimum spring-back. Moreover, it was observed that the increase in holding time caused grain growth, increased diffusion and color transformation.



Al7075-T6 sac malzemede tavlamanın şekillendirilebilirlik ve geri esnemeye etkilerinin deneysel araştırılması

İbrahim Karaağaç¹ , Mehmet Okan Kabakçı^{1*} , Mehmet Yasin Demirel²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500 Teknikokullar Ankara
²Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, TAI, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tavlama sıcaklığı ve tavlama sıcaklığında tutma süresi arttıkça şekillendirilebilirlik artmıştır
- Tavlama sıcaklığı ve tavlama sıcaklığında tutma süresi arttıkça tane boyutları ve tane sınırları büyümüştür
- Tane boyutlarının ve tane sınırlarının büyümesi ile sertlik azalmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 14.11.2019
Kabul: 18.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.647009

Anahtar Kelimeler:

Geri esneme,
ileri esneme,
tavlama,
Al7075-T6

ÖZ

Bu çalışmada Al7075-T6 sac malzemesinin tavlama parametrelerine bağlı olarak V bükme ile şekillendirilebilirliği ve geri esneme davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Tavlama işlemleri, farklı tavlama sıcaklıklarında (100°C, 200°C, 300°C ve 400°C) ve farklı tavlama sıcaklığında tutma sürelerinde (6, 30 ve 60 dk.) uygulanmıştır. Tavlanan Al7075-T6 numunelerin şekillendirilebilirliği 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° derece açılı V bükme kalıplarında sabit deformasyon hızında bükülerek incelenmiştir. Ayrıca, tavlanan numunelerde tavlama süresinin artmasına bağlı olarak 300°C sıcaklık ile birlikte çökelti oluşumu gözlemlenmiştir. Yükselen tavlama sıcaklığına bağlı olarak tane boyutlarında artma ve sertlikte de azalma gözlemlenmiştir. Tavlınmamış numunelerin oda sıcaklığındaki (RT) sertlik değerleri 200,67 HV iken, 400°C sıcaklıkta 60 dk. süre ile tavlanan numunelerin sertliğinin 62,90 HV değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak tavlınmamış numuneler en fazla 15° büküm açısına kadar bükme ile şekillendirilebilirken, 300°C ve üzeri sıcaklıklarda tavlanan numuneler 75° büküm açısında dahi çatlama ve kırılma olmaksızın sorunsuzca şekillendirilebilmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda tavlanan numunelerde düşük sıcaklıklarda tavlanan numunelere kıyasla geri esneme davranışının ortalama %80-90 oranlarında daha az miktarda meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Experimental investigation of the effects of annealing in Al7075-T6 sheet metal material on formability and springback

H I G H L I G H T S

- Formability increased due to increasing annealing temperature and holding time
- Grain size and grain boundaries increased due to increasing annealing temperature and holding time
- Hardness decreased due to increasing grain size and boundaries

Article Info

Research Article
Received: 14.11.2019
Accepted: 18.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.647009

Keywords:

Spring-back,
reverse spring-back,
annealing,
Al7075-T6

ABSTRACT

In this study, the formability and spring-back behavior of Al7075-T6 sheet material were experimentally investigated using a V-bending process, depending on the annealing parameters. Annealing processes were applied at different annealing temperatures (100°C, 200°C, 300°C, and 400°C) and holding times (6, 30, and 60 minutes). The formability of the annealed Al 7075-T6 specimens were investigated by bending at a constant deformation velocity with 15°, 30°, 45°, 60°, and 75° degrees angled V bending dies. Besides, depending on the increase in the annealing time on the annealed samples, precipitation was observed with a 300°C annealing temperature. Depending on the increasing annealing temperature, an increase in grain size and a decrease in hardness were observed. While the hardness values of the non-annealed specimens were 200.67 HV at room temperature (RT), but also it was observed that the hardness of the specimens annealed at 400°C for 60 minutes decreased to 62.90 HV. According to this situation, unannealed specimens can be formed by V-bending up to 15° bending angle, while specimens annealed at 300°C and above can be formed successfully without cracking and breaking even at 75° bending angle. It was observed that the spring-back behavior of specimens annealed at high temperatures occurred at a rate of 80-90% less compared to specimens that were annealed at low temperatures.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Isıl işlem uygulanabilen 7xxx serisi Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımları, düşük yoğunlukları, yüksek mukavemet değerleri ve yüksek korozyon dirençlerinden dolayı başta savunma, havacılık, otomotiv ve inşaat endüstrileri olmak üzere çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda ana malzeme olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu malzemenin, oda sıcaklığındaki (RT) sınırlı şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle soğuk şekillendirilebilmeleri genellikle zordur. Bu nedenle, şekillendirme öncesinde şekillendirilebilirliğini arttırabilmek için ısıl işlem ile müdahale etmek gerekmektedir. Ancak bu işlem malzemede mukavemetin önemli ölçüde azalmasına da neden olmaktadır [1-3]. Literatürde, Al7075 malzemelerde şekillendirilebilirliği arttırmak için proses öncesi uygulanan ısıtma işlemleri lazer ile ısıtma, indüksiyon ile ısıtma ve kalıp-zımba grubunun ısıtılması olmak üzere farklı çalışmalar yapılmıştır. Al7075-T6 sac malzemede şekillendirilebilirliği arttırmak için Kumar, 200-480°C sıcaklık aralığında bir dizi şok ısıl işlem (SHT) uygulamıştır. SHT'den sonra numunelerin şekillendirilebilirliğini oda sıcaklığında derin çekme testleri ile araştırılmıştır. Çalışmasında, 300°C'den itibaren şekillendirilebilirliğin iyileşmeye başladığını gözlemlemiştir [4]. Tajally vd. de Al7075-O sac malzemenin elde edilen 0°, 45° ve 90° çekme yönünde 270°C, 350°C, 400°C ve 450°C sıcaklıklarda 5 dk. tavlama deney numunelerinin mekanik özelliklerini ve şekillendirilebilirliklerini derin çekme deneyi ile incelemiştir. 350°C'nin üzerinde tavlama numunelerin daha iyi şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip olduğunu ve tavlama sıcaklığının artışıyla şekillendirilebilirlik parametrelerinin iyileştiğini gözlemlemiştir [5]. Jeshvaghani vd., Al7075 alüminyum alaşımının mukavemet özelliklerinde azalma olmaksızın geri esneme miktarını ve korozyon duyarlılığını azaltmak için çok aşamalı ısıl işlem uygulamışlardır. Deneysel çalışmada, silindirik formda bir bükme kalıbı kullanılmıştır. Deney sonuçları, Al7075 malzemelere uygulanan çok adımlı ısıl işlemin; düşük geri esneme miktarı, yüksek korozyon direnci ve çekme mukavemeti kombinasyonunu sağladığını tespit etmişlerdir [6]. Gisario vd. araştırmalarında, harici bir lazer yardımıyla bükme bölgesinin; bölgesel olarak ısıtılması ile Al7075-T6 alüminyum sac malzemelerin bükme ile şekillendirilebilirliğini incelemiştir. 140°C'ye kadar yüksek bükme açıları ve keskin zımba uç yarıçapları için geri esneme değerlerini deneysel olarak araştırmışlardır. Lazer yöntemiyle bükme bölgesinin ısıtılmasının, yüksek açılarda bükme işlemi sırasında her iki tür malzeme için de çatlak riskini azalttığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda, lazer yöntemiyle ısıtmanın geri esneme miktarını geleneksel bükme yöntemlerine göre 30 kat daha fazla sınırladığı ve bükme bölgesinin görselliğini olumsuz etkilemediği belirlenmiştir [7]. Polak vd. çalışmalarında Al7075-T6 alüminyum sac malzemenin yapılmış bir otomotiv parçasının sıcak şekillendirme sürecini analiz etmişlerdir. Kalıp ve zımba 200°C ve 250°C sıcaklıklara rezistans ile ısıtılarak, 5, 15 ve 30 dk. bekleme sürelerinde testler yapılmıştır. Çalışmanın sonraki aşamasında, parçalar

şekillendirildikten sonra kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığında soğutulmuştur. Deney sonuçlarından, kalıbın ve zımbanın sıcaklığı 240°C'ye eşit iken parçanın sıcak şekillendirilmesinde herhangi bir çatlak ve kusur olmaksızın istenilen şeklin tam olarak şekillendirilebilirliği tespit edilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda şekillendirilen parçanın mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir [8]. Kılıç vd. yaptıkları çalışmalarında, 2 mm kalınlığında ki Al7075 sac metal malzemesini 500°C'de 2 saat süre ile çözeltiye almışlar ve oda sıcaklığında su verme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Sonrasında 30 dk. boyunca 120°C, 160°C, 200°C sıcaklıklarda yapay yaşlandırma işlemi uygulayarak çekme ve bükme testleri ile malzemenin şekillendirilebilirliğini incelemiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda; 200°C'de yaşlandırılan numunelerin ön gerilme miktarının artmasına bağlı olarak geri esneme miktarında ve akma mukavemeti değerlerinde önemli bir azalmanın meydana geldiğini gözlemlemiştir [9]. Isıl işlem etkilerinin araştırıldığı bir diğer çalışmada ise Kılıç ve Kacar; 7075-T6 alüminyum alaşımının şekillendirilebilirlik sınır diyagramını (SSD) deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında 2 mm kalınlığa sahip Al7075-T6 sac metal malzemesi 500°C sıcaklıkta 2 saat boyunca solüsyona almışlar ardından oda sıcaklığında su vermişlerdir. Sonrasında, T6 temperinde ve solüsyona alınmış deney numuneleri ile şekillendirme testleri gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen şekillendirilebilirlik sınır diyagramları sonucunda solüsyona alma işleminin şekillendirilebilirliği artırdığını gözlemlemiştir [10]. Özyürek vd. ise yaptıkları çalışmada yeniden çözeltiye alma işleminin Al7075-T6 alaşımına etkilerini deneysel olarak incelemiştir. T6 yaşlandırma işlemi uygulanmış alüminyum alaşımlarına 180-260°C sıcaklıklarda 15-75 dk. sürede yeniden çözeltiye almışlar ve 120°C'de 24 saat yeniden yaşlandırma (RRA) işlemi uygulamışlardır. Yeniden yaşlandırılan numunelere sertlik ve çekme testleri uygulayarak mekanik özelliklerini incelemiştir. Yaptıkları testler sonucunda, yeniden çözeltiye alma sıcaklığının ve süresinin artması ile malzemenin sertliğinin ve çekme dayanımının azaldığını ifade etmişlerdir [11, 12]. Huo vd. solüsyona alma işleminde ısıtma hızının AA7075 alaşımının mikro yapı, korozyon direnci ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini inceledikleri deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, yüksek ısıtma hızı kullanılması ile malzemenin korozyon dayanımının ve sünekliğinin önemli ölçüde geliştirilebildiğini gözlemlemiştir [13]. Wang vd. hızlı ve yavaş ısıtılarak ısıl işleme tabi tutulan AA7075 sac metal malzemesinin mikro yapısında meydana gelen değişimleri inceledikleri deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonucunda yavaş ısıtılan numunelerin daha iri tane boyutlarına sahip olduklarını gözlemlemiştir [14].

Alüminyum malzemelerin şekillendirilebilirliğini arttırmak için literatürde uygulanan tavlama süreçleri (çözeltiye alma- soğutma-tavlama sıcaklığında bekletme gibi) çok sayıda metalürjik proses gerektirmekte, bu durum da zaman alıcı ve ekonomik olmayabilmektedir. Bu çalışmada da, Al7075-T6

alüminyum sac malzemenin sadece farklı tavlama sıcaklığı ve farklı tavlama sıcaklığında tutma süresinde bekletilmesiyle V bükme ile şekillendirilebilirliği ve V bükme operasyonu ile bükülmesi sonucunda malzemede oluşan geri esneme davranışının deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Deney numuneleri; 3 mm kalınlığındaki sac malzemeden, 20 mm x 40 mm ölçülerinde ve 0° hadde yönünde giyotin makas ile kesilerek hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan Al7075-T6 (ISO AlZn5.5MgCu) sac malzemesinin yapılan kimyasal analizden (XRF) elde edilen test sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

Sac malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme ve sertlik ölçme testleri yapılmıştır. 0°hadde yönünde tel erozyon tezgâhında ASTM-E8M standardına uygun olarak kesilerek hazırlanan çekme numuneleri, deney parametrelerine göre farklı sıcaklık ve tavlama sürelerinde tavllanmışlardır. Test numunesinin çekme testi öncesi ve test sonrası görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir.

2.2. Deney Düzenegi ve Parametreleri (Experimental Setup and Parameters)

Bükme ile şekil verme işlemleri bilgisayar kontrollü ve kalibrasyonu yapılmış bir deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Deney düzeneği yazılımında uygulanan

kuvvetler gerçek zamanlı anlık olarak izlenebilmekte ve anlık toplanan veriler grafiksel olarak da ifade edilebilmektedir. Deney düzeneğinde; şekillendirme kuvveti ve şekillendirme hızı yazılıma veri olarak girilebilmektedir. Deneysel çalışma ortamı, deney düzeneği ve kalıp-zimba düzeneği Şekil 2’de verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda 15°-30°-45°-60°-75° büküm açılarında V bükme kalıpları ile uç radyüsü 0 mm olan zimbalar kullanılmıştır. Şekillendirme kalıpları, deney numunesinin ortalı olarak ve herhangi bir kayma olmadan kolayca yerleştirilebileceği şekilde tasarlanarak üretilmiştir. Bu sayede deney numunesinin hatalı yerleştirildiği uygulanmaların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, şekillendirme operasyonları sırasında uygulanan kuvvetin ve kuvvet değişimlerinin anlık olarak takip edilebilmesi için zimba ile şekillendirme silindiri arasında yük hücresi bulunmaktadır.

Deney parametresi olan ütüleme süresi ve şekillendirme hızı parametreleri programa veri olarak girilmektedir. Çalışma kapsamında ütüleme süresi 0 sn ve şekillendirme hızı da 10 mm/sn olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan deney parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada tekrar edilebilirliği ortaya koymak amacıyla her bir deney 2 defa tekrar edilmiştir.

2.3. Tavlama İşlemi ve Tavlama Prosesi (The Annealing Process and Parameters)

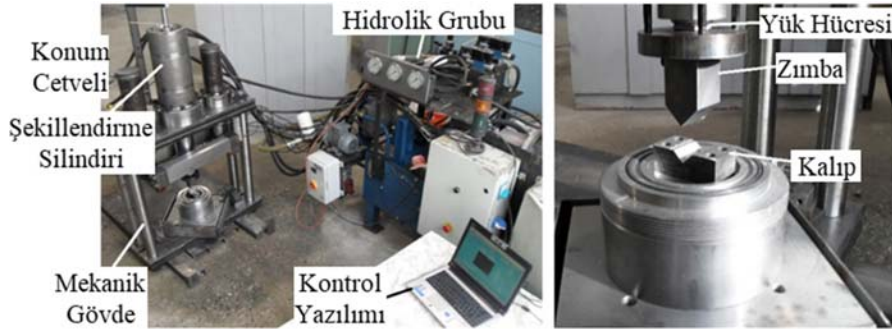
Kesilerek hazırlanan deney numunelerine 100°C, 200°C, 300°C, 400°C sıcaklıklarda ve 6 dk., 30 dk., 60 dk. tavlama sıcaklığında bekletme sürelerinde Elektronik PID kontrollü

Tablo 1. Al7075-T6 alüminyum sac malzemesinin kimyasal analiz (Spektrometre-XRF) test sonuçları
(The chemical analysis (Spectrometer-XRF) test results of Al7075-T6 sheet metal material)

Malzeme	%Al	%Zn	%Cu	%Cr	%Ti	%Fe	%Mn	%Zr	%Ni	%Diğer
Al7075-T6	92,432	5,481	1,534	0,169	0,144	0,112	0,037	0,035	0,016	0,04



Şekil 1. Al7075-T6 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası
(Al7075-T6 tensile test specimens a) Before test b) After test)



Şekil 2. a) Deneysel çalışma ortamı ve deney düzeneği; b) Kalıp-zimba düzeneği
(a) Experimental environment and experimental setup; b) Die and punch setup)

rezistans ısıtmalı fırın kullanılarak tavlama işlemi uygulanmıştır. Literatürde, tavlama sıcaklığında bekleme süresinin artması ile birlikte malzemenin aşırı yaşlandığı gözlemlenmektedir [15]. Bu çalışma kapsamında da 3 mm kalınlığındaki deney numuneleri için tavlama sıcaklığında bekleme süresinin zamana bağlı etkisini gözlemlemek amacıyla tavlama süreleri 6 dk., 30 dk. ve 60 dk. olarak belirlenmiştir. Tavlama işleminde, fırın içinde sepete dizilen çekme numuneleri ve deney malzemeleri seramik raflara yerleştirilerek fırının kapağı kapatılmıştır. Fırının PID kontrol ünitesinden tavlama prosesinin parametreleri seçilerek tavlama işlemine başlanmıştır. Deney numuneleri, belirlenen tavlama sıcaklığında belirlenen bekleme süresince sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Tavlama sıcaklığında bekleme süresi bittikten sonra, sirkülasyon fanı çalışır halde fırının kapağı kapalı olarak numune sıcaklıkları oda sıcaklığına düşüncye kadar beklenmiştir.

2.4. Mikro Yapı İncelemesi (The Microstructure Investigation)

Çalışma kapsamında, tavlama sıcaklıklarının ve tavlama sıcaklığında bekleme sürelerinin Al7075-T6 sac malzemesinin mikro yapısına etkilerini incelemek amacı ile

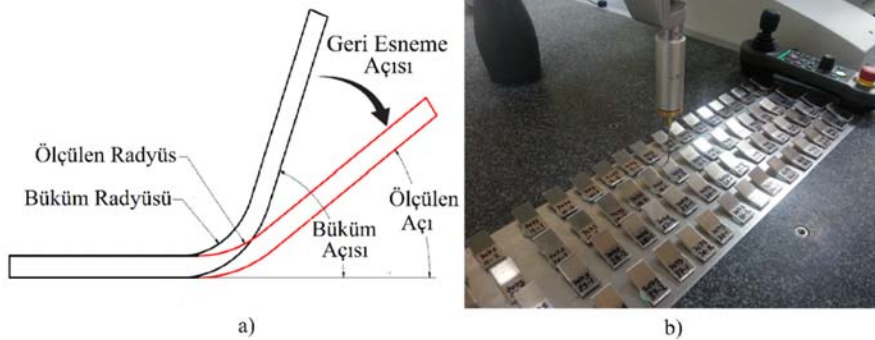
taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla deney numunelerinin mikro yapıları incelenmiştir. Mikro yapı incelemesi öncesinde bakalite alınan deney numuneleri sırasıyla zımparalama ve keçe ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminin ardından temizlenen numuneler Keller ayırıcı (1 ml hidroflorik asit HF; 1,5 ml hidroklorik asit HCl; 2,5 ml nitrik asit HNO₃; 95ml su H₂O) kullanılarak 30 sn boyunca dağlama işlemi yapılmıştır.

2.5. Geri Esneme Davranışı ve Geri Esnemenin Ölçümü (Springback Behaviour and Measurement of Springback)

Deneyisel çalışmalarda bükülerek şekillendirilmiş deney numunelerinin geri esneme açılarının ölçümü koordinat ölçüm cihazı (CMM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçme işleminde, ölçüm probu büküm yüzeylerinin her birinde bir düzlem oluşturacak şekilde 3 farklı noktaya değiştirilmiş, oluşan iki düzlem arasındaki açı ölçülmüştür. Bükülerek şekillendirilmiş deney numunesinden yazılım ile ölçülen açılardan büküm açıları çıkarılarak esneme açıları elde edilmiştir. Geri esnemenin şematik gösterimi ve koordinat ölçüm cihazı ile yapılan ölçme işlemi Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Deneysel çalışma parametreleri (Experimental parameters)

Deney Parametreleri	RT (Oda Sıcaklığı)
Tavlama Sıcaklığı (°C)	100°C 200°C 300°C 400°C
Tavlama Sıcaklığında Bekleme Süresi (dk.)	6 dk. 30 dk. 60 dk.
Büküm Açısı (°)	15° 30° 45° 60° 75°
Zımba Uç Radyüsü (mm)	R = 0 mm
Şekillendirme Hızı (mm/sn.)	10 mm/sn
Ütuleme Süresi (sn.)	0 sn

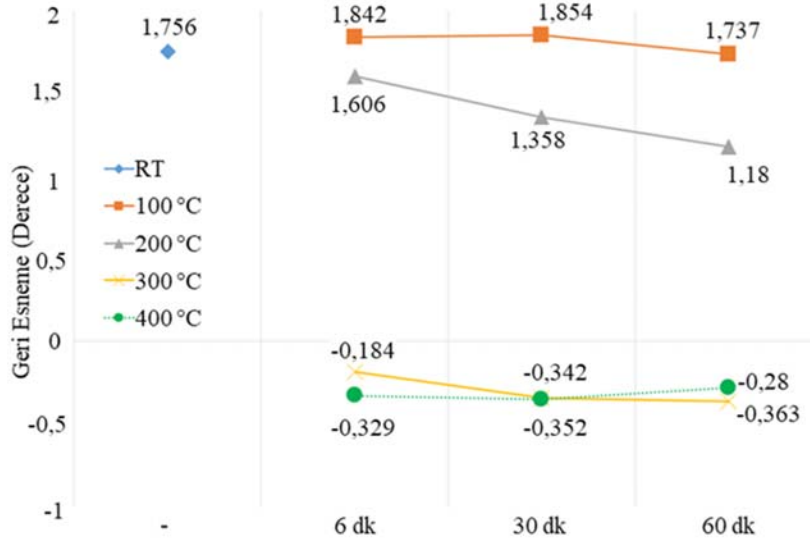


Şekil 3. a) Geri esnemenin şematik gösterimi; b) CMM ile geri esnemenin ölçümü
(a) Schematic representation of springback; b) Springback measurement using CMM)

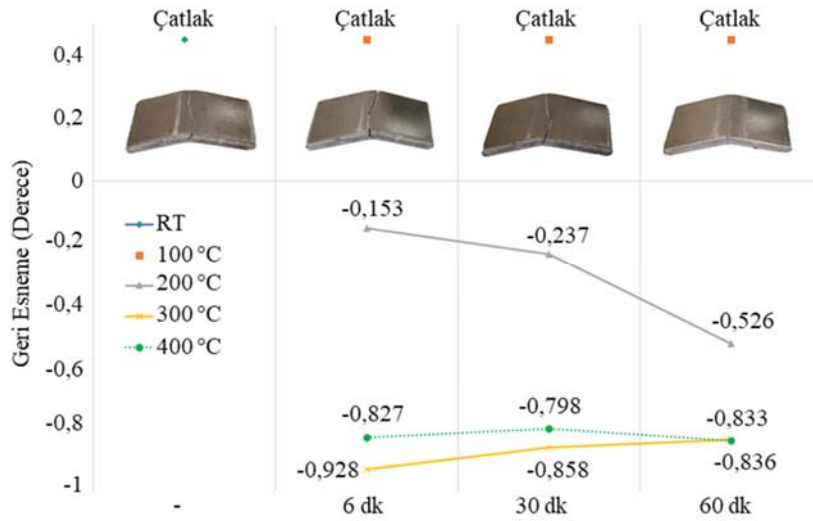
3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

Şekillendirilen Al7075-T6 malzemelerin farklı tavlama parametrelerinde V bükme ile şekillendirilebilirlikleri ve şekillendirilen malzemelerin geri esneme açılarındaki değişim mikro-yapıdaki değişimler de göz önünde bulundurularak yorumlanmıştır. Sac şekillendirme işlemleri sırasında meydana gelen çatlama ve kırılmalar şekillendirme kusuru olarak tanımlanmaktadır. Bükülerek şekillendirilen parçada oluşan geri esneme, çatlama ve kırılma gibi problemler üretim prosesinde aksamalara sebep olmaktadır. Bükme operasyonlarında büküm bölgesinde gerilme varyasyonları oluşmakta, malzeme üzerindeki yük kaldırıldığında ise malzeme eski haline dönmeye çalışmaktadır. Malzemenin elastik toparlanması nedeniyle oluşan açısız değişim geri esneme olarak tanımlanmaktadır. Geri esneme, sac şekillendirme işlemlerinde, mümkün

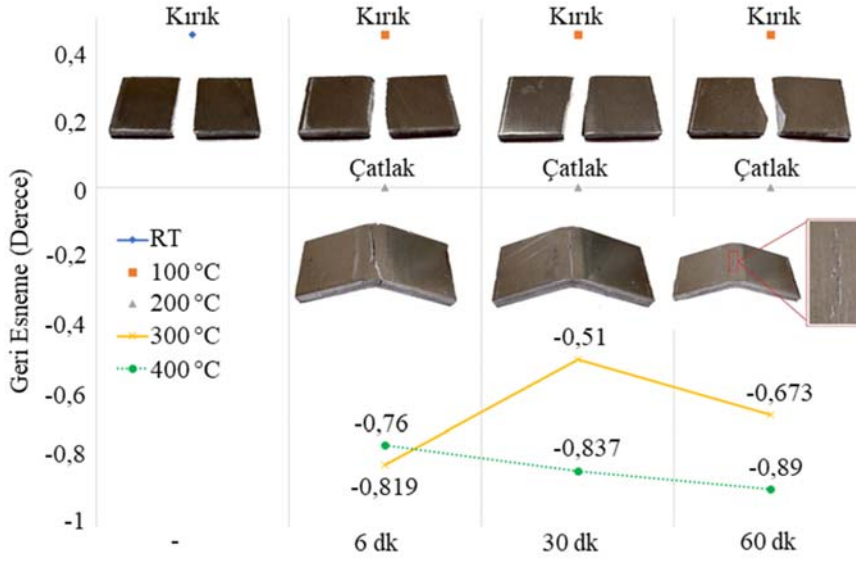
olduğunca azaltılması gereken bir şekillendirme hatası olarak görülmektedir. Geri esneme hatalarından dolayı açısız olarak uygun olmayan parçalar çeşitli montaj problemlerine, işçilik ve zaman kayıplarına neden olmaktadır [16-18]. Yapılan şekillendirme çalışmaları sonucunda; 15° büküm açısında tüm numuneler herhangi bir kusur ile karşılaşmadan şekillendirilebilmiştir. 30° büküm açısında şekillendirme sonucu çatlaklar meydana gelmiştir. 45°, 60° ve 75° büküm açısında gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri sonucunda ise tavlınmamış olan (RT) numuneler ve 100°C sıcaklıkta tavlanan numuneler kırılmış; 200°C sıcaklıkta tavlanan numunelerde ise çatlaklar oluşmuştur. Tüm şekillendirme işlemleri göz önüne alındığında ise 400°C-30 dk. tavlama parametrelerinde tavlanan numunelerin bükme açısına en yakın değerleri sağladığı gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri sonucu elde edilen şekillendirilebilirlik ve geri esneme verileri Şekil 4-Şekil 8 arasında verilmiştir.



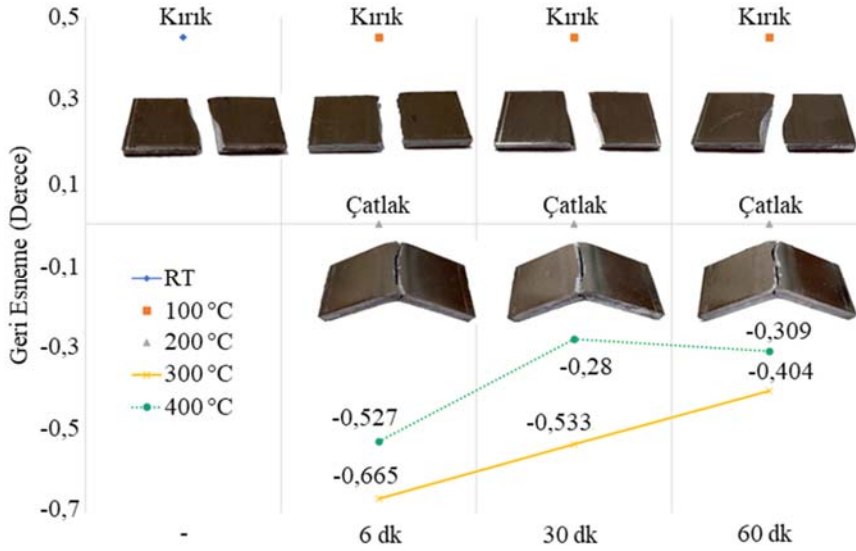
Şekil 4. 15° büküm açısında şekillendirilebilirlik-geri esneme ilişkisi (Formability and springback relationship for 15° bending angle)



Şekil 5. 30° büküm açısında şekillendirilebilirlik-geri esneme ilişkisi (Formability and springback relationship for 30° bending angle)



Şekil 6. 45° büküm açısında şekillendirilebilirlik-geri esneme ilişkisi (Formability and springback relationship for 45° bending angle)

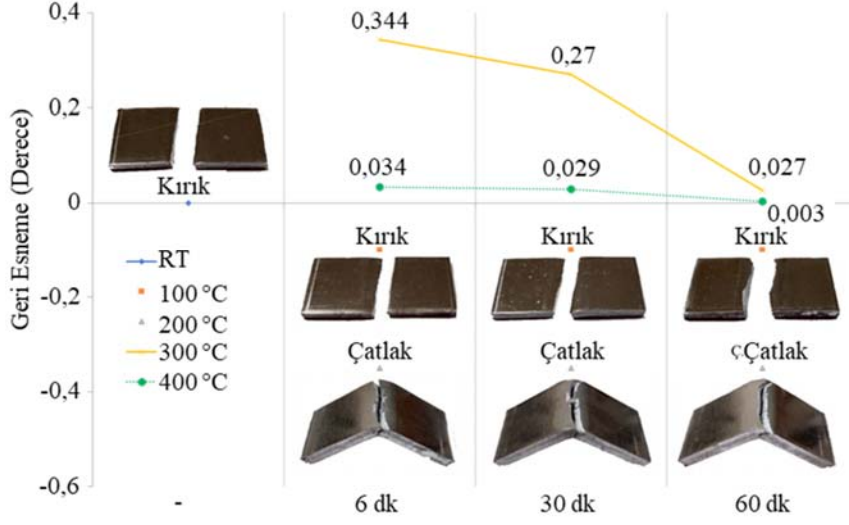


Şekil 7. 60° büküm açısında şekillendirilebilirlik-geri esneme ilişkisi (Formability and springback relationship for 60° bending angle)

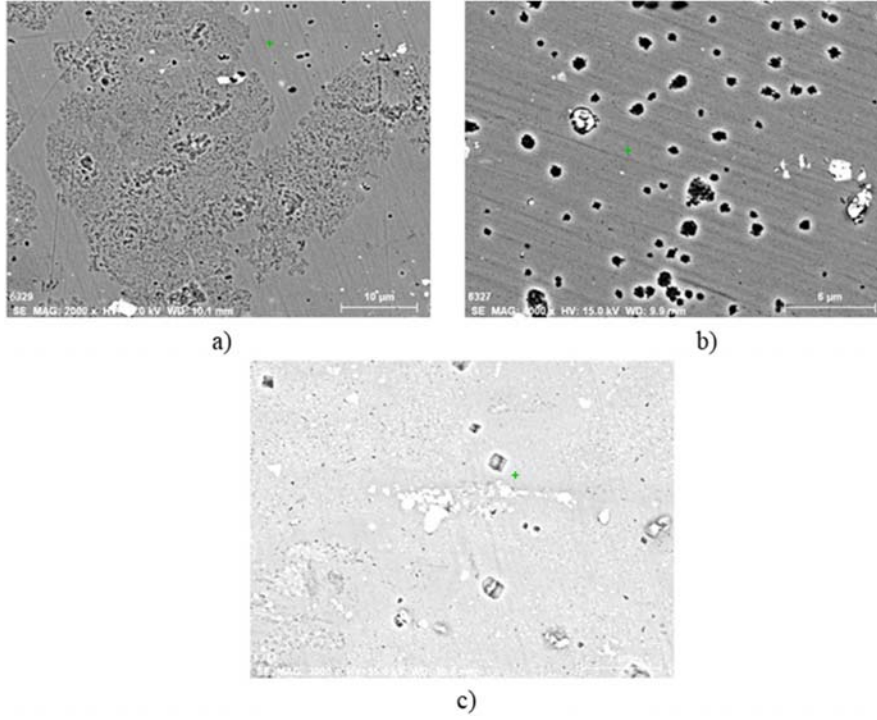
Al7075-T6 alüminyum alaşımının tavlama sıcaklığına ve tavlama sıcaklığında bekleme süresine bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler Şekil 9'da verilmiştir. Al-Zn-Cu alaşımlarının genel çökeltme dizisi şu şekilde sıralanabilmektedir: Katı çözeltiler → GP bölgeleri → Yarı kararlı η' fazı → kararlı η fazı. η fazının oluşumu genellikle alüminyum alaşımının mukavemetinde azalmaya yol açmaktadır. Bu nedenle, mekanik özellikleri optimize etmek için, ısıtma işlemlerinin farklı aşamalarında hangi fazların mevcut olduğunu ortaya koymak gerekmektedir [19].

Farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen işlemler sonucunda kimyasal bileşimden bağımsız olarak tavlama işleminin gerçekleştirildiği sıcaklığın artmasına bağlı olarak çökelti sayısının ve boyutunun arttığı görülmektedir. 120°C ile 170°C arasında, η' fazı çökeltilerinin oluşumu baskın

olurken, 170°C ve 250°C arasında denge η (Mg_2Zn) fazının çekirdeklenmesi ve büyümesi gerçekleşmektedir [21]. Deneysel çalışmalarda oluşan bu çökeltilerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonucunda, ölçülen sertlik değerlerinde 200°C'de 60 dk. 'ya kadar düzenli bir azalış gözlemlenirken, bu sıcaklıktan sonra ani bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. 200°C tavlama sıcaklığına kadar, çökeltiler matris ile uyumlu olduğundan malzemede yüksek mukavemet ve sertlik değerleri gözlemlenmiştir (Şekil 2.) [20]. Bu noktadan sonra, çökelti parçacıklarının matris ile tutarsızlıklarından dolayı sertleşme etkisini kaybetmektedir. 200°C'nin üzerindeki tavlama sıcaklıklarında tavlama işlemi olan deney numunelerinin mekanik değerlerinde ise keskin bir değişim gözlemlenmemiştir (Şekil 2.). 300°C ve 400°C sıcaklıklarda farklı tavlama sıcaklığında bekleme



Şekil 8. 75° büküm açısında şekillendirilebilirlik-geri esneme ilişkisi (Formability and springback relationship for 75° bending angle)



Şekil 9. a. Al7075-T6 sac malzemesinin tavlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler a) RT b) 200°C 60 dk. c) 400°C 60 dk. [20] (a. The changing of Al7075-T6 sheet metal's micro-structure according to the annealing heat and holding time a) RT b) 200°C 60 min c) 400°C 60 min [20])

sürelerinde gerçekleştirilen tavlama işlemleri sonucunda çökeltilerin boyutları büyümüştür ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği ölçülen sertlik değerlerindeki azalma ile de gözlemlenmiştir. Uygulanan tavlama işlemlerinin sac malzemenin mukavemet değerlerini önemli ölçüde etkilediği yapılan çekme testleri ile belirlenmiştir. Oda sıcaklığında 542,25 MPa akma dayanımına sahip olan sac malzeme; 100°C-60 dk. tavlama parametrelerine kadar düzenli bir değişim göstermemiştir. Ancak, 200°C tavlama

sıcaklığı ile akma mukavemeti azalmaya başlamış ve 300°C tavlama sıcaklığı parametresine geçildiğinde ise mukavemette ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Artan tavlama sıcaklığı ve bekleme süresi parametreleri ile de giderek azalan akma dayanımının 400°C-60 dk. tavlama parametrelerinde başlangıca göre %80 azalarak 108,32 MPa değerine gerilediği belirlenmiştir. Tavlama işlemi sonrasında; numunelerin üç farklı bölgesinden sertlik ölçümleri yapıp, sonuçların aritmetik ortalaması alınarak

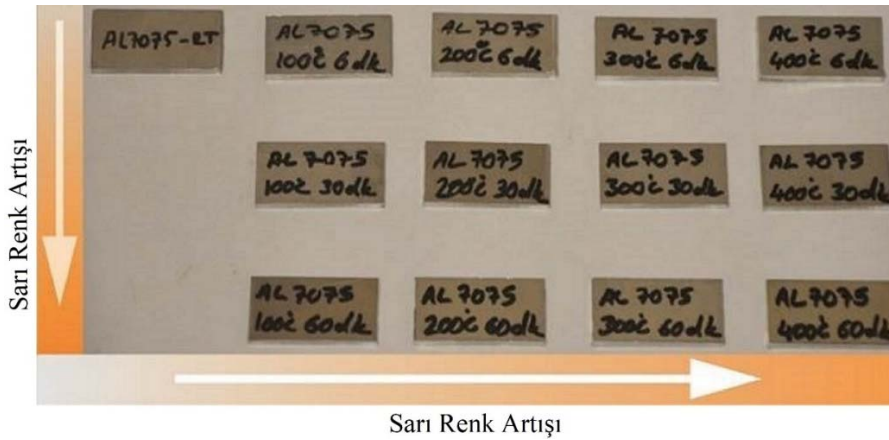
ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik ölçme işlemi Emco Test Duravision 2000 marka sertlik ölçme cihazında HV10 yük kullanılarak yapılmıştır. Uygulanan tavlama işlemleri ile Al7075-T6 sac malzemesinin aşırı yaşlanmasına sebep olduğu ve dislokasyon hareketlerinin kolaylaşması sonucunda sertlik değerlerinde değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Endüstriden temin edilen sac malzemenin ticari haliyle sertlik değeri ortalama 200,67 HV olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 100°C’de gerçekleştirilen tavlama işlemlerinden itibaren artan sıcaklık ve bekleme süresi parametrelerine de bağlı olarak, ortalama sertlik değerlerinin de giderek azaldığı gözlemlenmiştir. En belirgin ortalama sertlik değeri azalmasının ise tavlama parametrelerinin 200°C-60 dk.’dan 300°C-6 dk.’ya değiştirildiğinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. 400°C-60 dk. tavlama parametrelerinde ise başlangıçta 200,67 HV olan ortalama sertlik değerinin %68,65 oranında azalarak 62,90 HV değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Tavlama işlemleri

sonucu değişim gösteren ve sertlik ölçme testi ile belirlenen ortalama sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi de Şekil 10’da verilmiştir.

200°C’den düşük sıcaklıklarda tavlanan Al7075-T6 alaşımı deney numunelerinin şekillendirilmesi sonucu geri esneme davranışı gözlemlenirken; 200°C’den yüksek sıcaklıklarda tavlanan numunelerinin sertlik değerlerinde meydana gelen azalmalar sebebiyle ileri esneme davranışının olduğu belirlenmiştir. Alüminyum alaşımları oksijen ile temas ettiğinde oluşan Al_2O_3 sonucunda tüm yüzeyi kaplayan bir alümin tabakası oluşmakta ve bu da yüzeyde renk değişimine neden olmaktadır [22]. Tavlama işlemlerinde sıcaklık ve bekleme süresi parametrelerinin artırılması ile sac malzemede renk değişimleri olduğu gözlemlenmiştir. Al7075-T6 sac malzemesinin tavlama parametrelerinin etkisiyle meydana gelen renk değişimi Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 10. Tavlama parametrelerine göre Al7075-T6 için sertlik değişimi
(The changing of hardness for Al7075-T6 according to annealing parameters)



Şekil 11. Al7075-T6 sac malzemesinin tavlama etkisi nedeni ile renk değişimi
(The color turning of Al7075-T6 sheet metal's due to annealing effect)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı tavlama sıcaklıklarında ve tavlama sıcaklığında bekletme sürelerinde PID kontrollü fırında ısıtılarak tavlanan Al7075-T6 alaşımı sac malzemenin farklı işlem parametrelerinde V bükme ile şekillendirilebilirliği ve şekillendirme sonucu malzemenin geri esneme davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Al7075-T6 malzemenin sıcaklığa karşı duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklığın artışına bağlı olarak, tane sınırlarının ergimesiyle mukavemet ve mekanik özelliklerde azalma gözlemlenirken, şekillendirilebilirlik özelliklerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Al7075-T6 alaşımının oda sıcaklığındaki sertliği ortalama 200,67 HV iken, 400°C sıcaklıkta 60 dk. tavlama sonrası sertlik değeri ortalama 62,90 HV değerine düşmüştür.
- Al7075-T6 alüminyum alaşımı; RT koşullarında sadece 15°'lik kalıp açısında V bükme ile şekillendirilebilirken, 30°'lik kalıp açısında büküm bölgesinde çatlak oluştuğu ve 45°, 60°, 75°'lik kalıp açılarında ise numunelerin büküm bölgesinden kırıldığı tespit edilmiştir.
- Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama sertlik ve mukavemet değerlerinin düştüğü ve bu duruma bağlı olarak geri esneme miktarının %80-90 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Sertlik ve mukavemet değerlerinin düşmesine bağlı olarak sac malzemedeki ileri esneme davranışının arttığı gözlemlenmiştir.
- Alüminyum 7075-T6 malzemeler sahip oldukları yüksek mukavemet düşük ağırlık özelliklerinin yanı sıra sınırlı şekillendirilebilirlik özelliğine sahiptirler. Tavlama ile şekillendirilebilirlik özellikleri artmakta ancak mukavemet özellikleri azalmaktadır. Tavlama sıcaklığı ve tavlama sıcaklığında bekletme süresi parametrelerine göre şekillendirilebilirliğin bükme açısına en yakın olduğu değer 400°C tavlama sıcaklığı ve 30 dk. tavlama sıcaklığında bekletme süresi olarak belirlenmiştir. Malzemenin endüstriyel tasarım ve/veya uygulama aşamasında mukavemet ve şekillendirilebilirlik açısından fayda/zarar oranı göz önünde bulundurularak kullanılması gerektiği belirlenmiştir.
- Difüzyon kolaylaşması ile çökelti boyutlarının büyüyerek dislokasyon hareketlerinin kolaylaşmasına ve bu sayede malzemenin mekanik özelliklerinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmalarda, estetik açıdan problem oluşturabilecek düzeyde artan renk değişimleri de gözlemlenmiştir. Bu durumun şekillendirilecek parçalarda estetik problemlere sebep olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lee, M.-Y., et al., Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, 155, 1337-1343, 2004.
2. Shaeri, M., et al., Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment. *Materials & Design*, 57, 250-257, 2014.
3. Yazdian, N., F. Karimzadeh, and M. Tavoosi, Microstructural evolution of nanostructure 7075 aluminum alloy during isothermal annealing, *Journal of Alloys and Compounds*, 493 (1-2), 137-141, 2010.
4. Kumar, M., AW-7075-T6 sheet for shock heat treatment forming process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(10), 2156-2162, 2017.
5. Tajally, M. and E. Emadoddin, Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets, *Materials & Design*, 32 (3), 1594-1599, 2011.
6. Jeshvaghani, R.A., et al., Influence of multi-step heat treatments in creep age forming of 7075 aluminum alloy: optimization for springback, strength and exfoliation corrosion, *Materials Characterization*, 73, 8-15, 2012.
7. Gisario, A., M. Barletta, and S. Venettacci, Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys, *Optics & Laser Technology*, 86, 46-53, 2016.
8. Polak, S., et al., Warm forming of 7075 aluminum alloys, *Procedia Engineering*, 207, 2399-2404, 2017.
9. Kılıç, S., Kacar, İ., Öztürk, F., Şahin, M., & Erdem, O., AA7075 Yaşlandırılmasında Farklı Ön Gerinmelerin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi, *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 31, 23-32, 2019.
10. Kılıç, S., & Kacar, İ., Farklı Isıl İşlem Uygulanmış 7075 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramının Deneysel Olarak Belirlenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 512-520, 2019.
11. Özyürek, D., Yılmaz, R., & Kibar, E., RRA İşleminde Yeniden Çözeltilmiş Alüminyum Alaşımlarının Çekme Dayanımına Etkisi, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 27 (1), 193-203, 2012.
12. Yılmaz, R., Özyürek, D., & Kibar, E., Yeniden Çözeltilmiş Alüminyum Alaşımlarının Sertlik Ve Aşınma Davranışlarına Etkisi, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 27 (2), 429-438, 2012.
13. Huo, W., Sun, T., Hou, L., Zhang, W., Zhang, Y., & Zhang, J., Effect of heating rate during solution treatment on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of high-strength AA 7075 alloy, *Materials Characterization*, 167, Pre-proof, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110535>, 2020.
14. Wang, L., Yang, X., Robson, J. D., Sanders, R. E., & Liu, Q., Microstructural Evolution of Cold-Rolled AA7075 Sheet during Solution Treatment, *Materials*, 13 (12), 1-15, 2020.
15. Shan, D., & Zhen, L., Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys, *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*, Cilt 1, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 267-297, 2012.
16. Farsi, M.A. and B. Arezoo, Bending force and springback in v-die-bending of perforated sheet-metal

- components, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 33 (1), 45-51, 2011.
17. Garcia-Romeu, M., J. Ciurana, and I. Ferrer, Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work, Journal of Materials Processing Technology, 191 (1-3), 174-177, 2007.
 18. Schilp, H., J. Suh, and H. Hoffmann, Reduction of springback using simultaneous stretch-bending processes, International Journal of Material Forming, 5 (2), 175-180, 2012.
 19. Chen, J., et al., Investigation of precipitation behavior and related hardening in AA 7055 aluminum alloy, Materials Science and Engineering: A, 500 (1-2), 34-42, 2009.
 20. Demirel, M., Karaağaç, I. 7075-T6 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Tavlama İşleminin Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması, Politeknik Dergisi , 23 (2), 283-289, 2020.
 21. Temmar, M., M. Hadji, and T. Sahraoui, Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints, Materials & Design, 32 (6), 3532-3536, 2011.
 22. Onur, A., AA6XXX serisi alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemine bağlı olarak işlenebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2014.

