



Isıl işlemin AA6061 alüminyum alaşımı sac metal malzemenin şekillendirilmesine etkilerinin incelenmesi

Elif MALYER*

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Manisa
elif.malyer@cbu.edu.tr ORCID: 0000-0001-9041-3842 Tel:0(236) 313 55 02 - 114

Selda AKGÜN KAYRAL

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Manisa
selda.akgun@cbu.edu.tr ORCID: 0000-0003-1971-1550

Geliş: 08.02.2018, Kabul Tarihi: 19.04.2018

Öz

Sac metal şekillendirme işlemi, otomotiv, ambalaj ve ev aletleri endüstrileri gibi birçok sektörde uygulama alanı bulan bir üretim yöntemidir. Bükme işlemi de bu üretim yöntemleri arasında en geniş uygulama alanına sahip işlemlerden biridir. Bükme işlemi dâhil tüm sac metal şekillendirme işlemlerinde en temel problem ise geri esnemedir. Geri esneme birçok işlem değişkeninden etkilenmektedir ve malzeme özellikleri bu değişkenlerin başında gelmektedir. Bu çalışmada yaşlandırma işleminin AA6061 alüminyum alaşımı sac metal malzemelerin geri esneme özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla 1mm kalınlığında AA6061 alüminyum alaşımı sac metal malzeme farklı ısıl işlemlere tabi tutularak farklı numune grupları oluşturulmuştur. Bükme işlemleri için CNC freze tezgâhı ve modüler bükme kalıbından yararlanılmıştır. İşlemlerde dört farklı bükme açısı ile üç farklı bükme radiusü kullanılmış, final bükme açıları imaj işleme yöntemi ile ölçülerek geri esneme miktarları tespit edilmiştir. Kullanılan yöntem ile meydana gelen geri esneme miktarının preste bükmeye kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Maksimum geri esneme miktarının yaşlandırıldıktan sonra bükülen numunelerde gözlemlendiği, çözeltiliye alındıktan sonra bükülen daha sonra yaşlandırılan numunelerin geri esneme değerlerinde, yaşlandırıldıktan sonra bükülen numunelerin geri esneme değerlerine kıyasla yaklaşık %65 azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA6061, mikrodalga, ısıl işlem, sac metal şekillendirme, geri esneme.

*Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Sac metal şekillendirme işlemi, otomotiv, ambalaj ve ev aletleri endüstrileri gibi birçok alanda uygulanan alanı bulan bir üretim yöntemidir (Meinders vd. 2008; Ling vd. 2005; Zhang vd. 2013). Bükme işlemi de bu üretim yöntemleri arasında en geniş uygulama alanına sahip işlemlerden biridir (Baseri vd. 2011; Liu vd. 2011; Cantelli vd. 2009; Gisario vd. 2011; Réche vd. 2012; Oanthi vd. 2010). Son yıllarda, yüksek dayanımları, düşük yoğunlukları ve iyi korozyon dirençleri ile sac metal alüminyum alaşımlarının bu endüstri alanlarındaki kullanımı yaklaşık dört kat arttığı tespit edilmiştir (Joseph 2003; Kahtraman 2008). Günümüzde bahsi geçen yöntemlerle şekillendirilen bu hafif malzemelerden elde edilen parçaların küçülmesi buna karşın parçanın boyutsal ve geometrik tolerans aralığının daralması beraberinde bazı problemleri de beraberinde getirmektedir (Ling vd. 2005; Joseph 2003). Bu durum onlarca yıldan beri başarılı bir şekilde uygulanıyor olmasına karşın halen tam anlamıyla anlaşılamayan işlem sürecini yeniden araştırma ya da tanımlama ihtiyacı doğurmuştur (Meinders vd. 2008).

Bu süreç içerisindeki en temel problem ise geri esnemedir (Chatti 2010; He vd. 2010; Lim vd. 2012; Wagoner vd. 2013; Toros vd. 2012). Geri esneme, dış yükler kaldırıldığında ürün şeklinde görülen elastik değişimi olarak adlandırılabilir (Meinders vd. 2008; Vladimirov vd. 2009). Geri esneme birçok işlem değişkeninden etkilenmektedir. Araştırmacılar bu değişkenleri iki grupta incelemiştir. Bunlardan ilki şekillendirilebilirliğe etki eden malzeme özellikleri, ikincisi ise işlem parametreleridir. Malzeme özellikleri; elastikiyet modülü, akma ve çekme dayanımı, uzama, pekleşme üsteli, plastik anizotropi, gerinme hızı duyarlılığı üsteli ve işlem parametreleri; deformasyon hızı, sıcaklık, sürtünme ve yağlama, sac baskı kuvveti, takım geometrisi ve ölçüsü, malzeme kalınlığı şeklinde sıralanabilir (Nasrollahi ve Arezoo 2012). Araştırmacılar nihai ürünün belirlenen geometrisinin elde edilmesinde önemli ve belirleyici bir parametre olan geri esnemenin tanımlanabilmesi amacıyla L-bükme, V- bükme

U bükme gibi deneysel test yöntemleri geliştirilmiştir. Ayrıca takımın ve işlem parametrelerinin geri esnemeye etkilerini araştırmak ve geri esneme kestirimi yapabilmek amacıyla sayısal analiz yöntemleri (SAY) de kullanılmaktadır (Chatti 2010; He vd. 2010; Lim vd. 2012).

Çalışma konusu sac malzeme olduğu için ısıtılma işlemi sırasında çarpılmalar kaçınılmazdır. Loganathan ve ark. (2014), mikrodalga fırınlar kullanılarak yapılan ısıtılma işlemlerinin geleneksel fırınlarla karşılaştırıldığında başarılı olduğu, işlem süresinin yine geleneksel fırınlar kullanılarak yapılan işleme kıyasla daha kısa olması ve enerji tasarrufu sağladığı, bu çalışma için daha da önemlisi işlem sırasında mikrodalga fırınla yapılan işlemlerde ince malzemelerin çarpılmadığı görülmüştür (Loganathan vd. 2014).

Literatürde dikkati çeken şudur ki, Kardeş Sever ve ark (2012) bükmede meydana gelecek geri esnemenin öngörülmesi ile ilgili çalışmalarında "V" bükme işlemlerinde geri esnemenin açılma olarak tespitinde görüntü işleme metodunu kullanarak sonuçları temassız ölçüm cihazından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yöntem hassasiyetinin bu işlemde kullanılabilir kadar yüksek olduğunu bildirmişlerdir (Kardeş Sever vd. 2012). Literatürdeki çalışmaların yanı sıra malzeme ve işlem şartları değişikçe meydana gelecek geri esneme miktarının ön görülmesi hala çözüm bekleyen problemlerden biridir ve bu konuda en kesin bilgiye deneme yanılma yöntemi ile ulaşılmaktadır. Bu çalışmanın amacı malzemeye uygulanacak ısıtılma işleminin geri esneme miktarına etkilerini incelemenin yanında bu işlemi daha kısa sürede ve daha düşük maliyet ile gerçekleştirilebilirliğini araştırmaktır. Bu nedenle çalışmada ısıtılma işlemi uygulanmış farklı numune grupları, farklı sac malzemelerin maksimum bükme açısı, geri esneme miktarı gibi bilgilerine kısa sürede deneysel olarak ulaşmak amacıyla her firmada uygulanabilecek deney düzeneği ile özel cihaz ve kalifiye eleman gerektiren ölçüm işlemleri yerine imaj işleme işleminden yararlanılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Çalışmada deney malzemesi olarak 1 mm kalınlığında AA6061-T6 alüminyum alaşımı sac metal malzeme kullanılmıştır. Çalışma kapsamında malzemenin kimyasal kompozisyonunu belirlemek üzere spektral analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

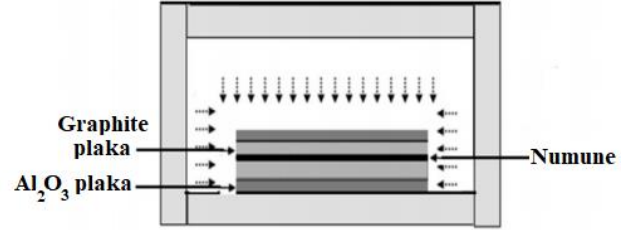
Tablo 1. AA6061-T6 alüminyum alaşımı malzemenin kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Si	0,077
Fe	0,042
Mn	0,012
Mg	0,093
Ni	0,001
Zn	0,003
Ti	0,005
Cu	0,023
Cr	0,017
Al	Kalan

Sac malzemeye uygulanacak ısıtma işlem yöntemlerinin malzemenin geri esneme davranışına etkilerini incelemek amacıyla farklı numune grupları oluşturulmuştur. Deney tasarımı Tablo 2’de belirtildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alma işlemi 550°C 4 saat bekletilerek ve sonrasında oda sıcaklığındaki suda soğutularak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel fırında ısıtma işlemi, 200°C’de 4,5 saat fırında bekletilerek ve sonrasında oda sıcaklığında soğutularak gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga fırında ısıtma işlemi 900 W’da 12 dak. bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga fırında gerçekleştirilen ısıtma işlem şartları Şekil 1’de şematik olarak verilmiştir. İşlemlerden sonra elde edilen malzeme sertlikleri ölçülmüş ve Tablo 3’te verilmiştir.

Deney numunelerinin geri esneme davranışlarının değerlendirilmesinde, referans olarak kullanılmak üzere, malzemenin farklı şartlardaki bazı mekanik özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri için numuneler, ASTM E8 standardına göre lazer kesme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil

2). Çekme deneyleri oda sıcaklığında, malzemenin hadde yönüne paralel yönde gerçekleştirilmiştir. Bükme deneylerinde kullanılan zımba hızı ile aynı olmasına dikkat edilerek çekme numuneleri 1 mm/dak. hızında çekilmiştir.



Şekil 1. Mikrodalga fırında ısıtma işlem şartları [Loganathan vd. 2014]

Tablo 2. Çalışmada kullanılan deney grupları.

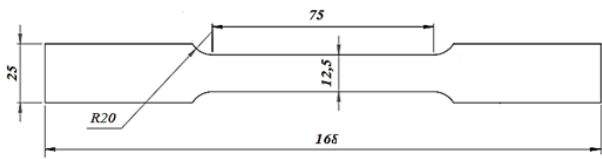
Grup	Özellik
1	Temin edildiği şekilde bükülmüş.
2	Çözeltiye alınmış, bükülmüş, geleneksel fırında yaşlandırılmış.
3	Çözeltiye alınmış, bükülmüş, mikrodalga fırında yaşlandırılmış.
4	Çözeltiye alınmış, geleneksel fırında yaşlandırılmış, bükülmüş.
5	Çözeltiye alınmış, mikrodalga fırında yaşlandırılmış, bükülmüş.
6	Çözeltiye alınmış, bükülmüş.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan malzeme gruplarının sertlikleri.

Malzeme	Sertlik (HBN)
AA6061-T6 (Temin edildiği gibi)	60
Çözeltiye alınmış	38,5
Geleneksel fırında yaşlandırılmış	102
Mikrodalga fırında yaşlandırılmış	51

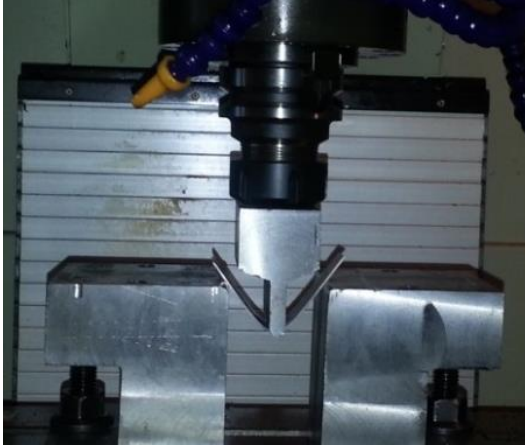
Serbest bükme deneyleri için 3-eksen CNC freze tezgâhından yararlanılmıştır. İşlemlerin gerçekleştirilebilmesi için basit ve modüler bir dişi kalıp ile farklı radüslere sahip zımbalar üretilmiştir. Dişi kalıp tezgâhın tablasına, zımba

ise pens adaptörü yardımıyla fener miline bağlanarak bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kalıp ve yöntem Şekil 3'te verilmiştir. V bükme işlemlerinde sıklıkla kullanılan pres tezgâhı ya da çekme cihazı yerine CNC freze tezgâhının kullanılmasındaki amaç işlem süresi ve maliyeti yüksek olan deneme-yanılma yöntemi ya da sayısal analiz programlarının kullanılması yerine farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin geri esneme davranışlarının daha kısa sürede ve daha düşük maliyet ile tespit edilebilirliğini incelemektir. Bu yöntemin tek dezavantajlı yönü



bükme kuvvetinin değiştirilememesidir.

Şekil 2. ASTM E8 standardına göre çekme deney numunesi (Tüm ölçüler mm)



Şekil 3. Bükme deneylerinin gerçekleştirildiği kalıp.

Bükme numuneleri her bir deney grubundan 25x110 mm ebatlarında lazer kesme yöntemi ile hazırlanmıştır. Bükme işlemlerinde kullanılan koşullar Tablo 4'te verilmiştir. Ayrıca bükme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için yazılan parça işleme programı ve her bir komutun

açıklaması Tablo 5'te verilmiştir. Yöntemde bükme açısı Şekil 3'te de görüldüğü üzere dışı kalıp ile değil zımbanın hareket miktarı ile belirlenmektedir. Bu nedenle hedeflenen bükme açılarına ulaşabilmek için zımbanın hareket miktarının (z) hesaplanması gerekmektedir. Bu amaç ile Eşitlik 1'de verilen formülden yararlanılmıştır.

$$z = \left(w \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) / 2 + \left[1 - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) - \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \cdot (R_p + R_d + s) \quad (1)$$

Burada w, kalıp açıklığı; β , 180-bükme açısı R_p , Zımba radüsü, R_d , kalıp radüsü ve s, sac malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

Tablo 4. Deney parametreleri.

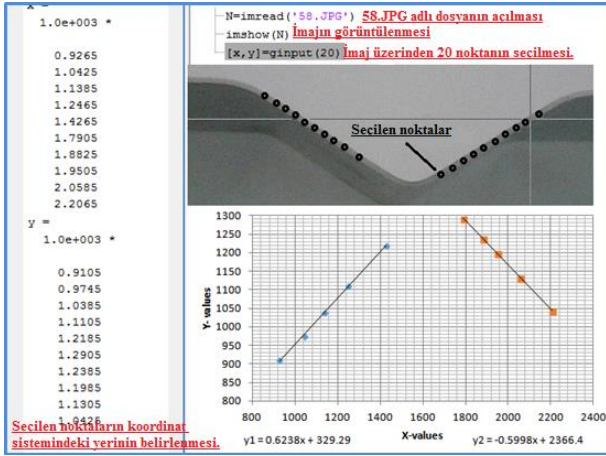
Deney Değişkenleri	Değerler
Zımba radüsü (mm)	4, 8, 16
Bükme açısı (°)	60, 90, 120, 150
Kalıp açıklığı (mm)	48
Kalıp radüsü (mm)	4

Tablo 5. Bükme işleminde kullanılan NC kodları.

NC kodları	Açıklama
G90 G54 G00 X0 Y0;	G90: mutlak programlama G54 iş parçası sıfır noktası G00 rapid hız ile zımbayı X0, Y0 konumuna gönderme
G43 Z10 H1 M19;	G43: takım boyu telafisi H1: takım uzunluğu ofseti Rapid hız ile zımbayı Z10 konumuna gönderme
Z1;	Rapid hız ile zımbayı Z1 konumuna gönderme
G01 Z-10 F1;	1mm/dak hız ile zımbayı Z-10 konumuna gönderme
Z10;	Zımbayı Z10 konumuna geri çağırma.

Geri esneme miktarının tespit edilebilmesi için imaj işleme yöntemi kullanılmıştır. Kardeş Sever ve ark. bu yöntemin temaslı ölçme yöntemlerine göre daha avantajlı olduğu ve onların yerine kullanılacak ölçüm toleranslarını sağladığını belirtmişlerdir (Longanathan vd. 2014). Bu nedenle bükme işlemleri gerçekleştirildikten sonra numuneler fotoğraflanmıştır. İmaj işleme yöntemi için MATLAB paket programından yararlanılarak numunelerin iki kolu üzerinden çok sayıda nokta toplanarak bu noktaların koordinat sistemi üzerindeki yeri belirlenmiştir.

İşlem Şekil 4'te görsel olarak özetlenmiştir. Elde edilen veriler Libre Office Calc. programı ile işlenerek iki eğri arasındaki açı hesaplanmıştır.



Şekil 4. İmaj işleme yönteminin görsel olarak açıklaması.

Çalışmada ayrıca her bir malzeme grubunun mikroyapısı incelenmiştir. Bu amaçla çıkarılan mikroyapı numuneleri soğuk kalıba alınmış, zımparalanarak, parlatılmış ve 25ml CH₄O, 25ml HCl asit, 25ml HNO₃ ve 1 damla HF karışımı ile dağlanmıştır. SEM incelemeleri sonucunda, malzemelerin geri esneme davranışlarının açıklanması için yeterli veri elde edilmiştir.

Deney Sonuçları ve Analiz

Her bir malzeme grubu için gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve % uzama miktarları Tablo 6'da verilmiştir.

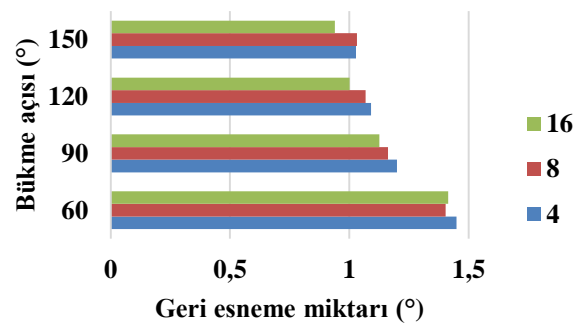
Bükme deneyleri hasarsız olarak gerçekleştirilerek final bükme açıları ölçülerek hesaplanan geri esneme miktarları Şekil 5-10'da numune grubu ve kullanılan zımba radüslerine göre verilmiştir.

Grup 1'de, herhangi bir işlem görmeden direkt serbest bükme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5'te verilen grafik incelendiğinde zımba radüsünün sabit olduğu şartlarda, bükme açısı azaldıkça geri esneme miktarının arttığı, zımba radüsünün geri esnemeye etkisinin bükme

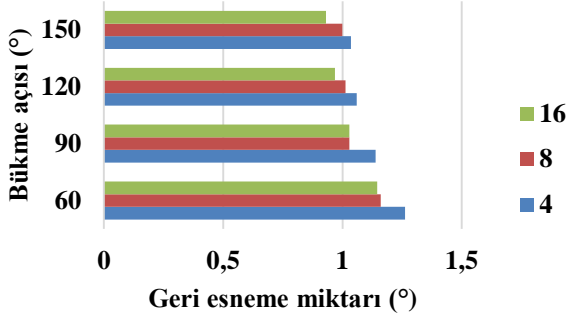
açısının etkisi kadar büyük olmadığı; fakat bükme açısının sabit olduğu şartlarda zımba radüsü arttıkça geri esneme miktarının da arttığı görülmektedir. Sonuçlar, literatürdeki çalışmaların sonuçları ve diğer numune gruplarının sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Grup 1'e ait numuneler diğer numuneler ile karşılaştırıldığında en büyük geri esneme miktarının bu gruba ait numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Bu grupta elde edilen maksimum geri esneme miktarı, bükme açısının 60°, zımba radüsünün 4 mm olduğu şartlarda yaklaşık 1,45°, minimum geri esneme miktarının bükme açısının 150° ve zımba radüsünün 16 mm olduğu şartlarda yaklaşık 0,939° olarak ölçülmüştür.

Tablo 6. Isıl işlem durumlarına göre malzemelerin maksimum çekme gerilmesi ve %uzama değerleri.

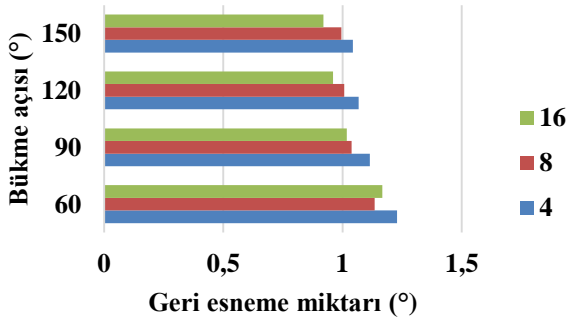
Malzeme	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	% uzama
AA6061-T6 (Temin edildiği gibi)	286.5833	12.1220
Çözeltiye alınmış	186.6603	19.2308
Geleneksel fırında yaşlandırılmış	215.5577	12.6370
Mikrodalga fırında yaşlandırılmış	187.257	19.0204



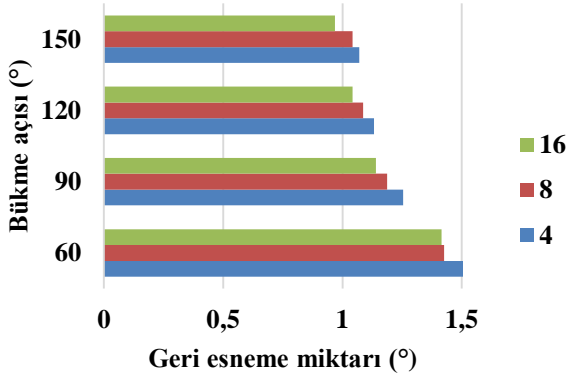
Şekil 5. Geri esneme-bükme açısı grafiği (numune grubu 1)



Şekil 6. Geri esneme-bükme açısı grafiği (numune grubu 2)



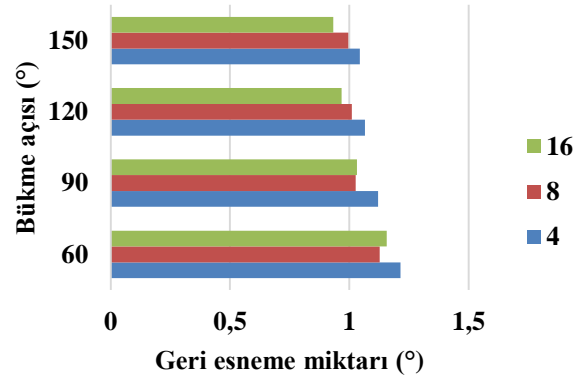
Şekil 7. Geri esneme-bükme açısı grafiği (numune grubu 3)



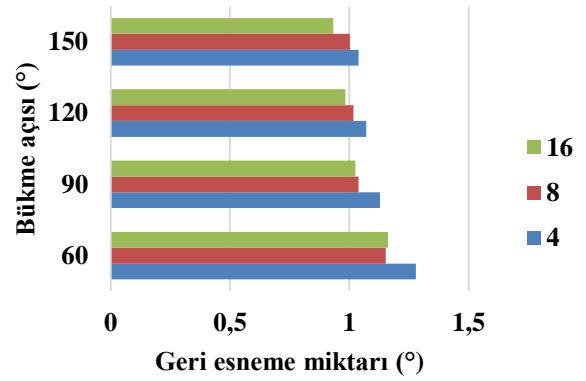
Şekil 8. Geri esneme-bükme açısı grafiği (numune grubu 4)

Çözeltiye alındıktan sonra bükme işlemlerinin gerçekleştirildiği diğer numune gruplarına ait grafikler Şekil 6, 7 ve 10'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde maksimum geri esneme miktarının çözeltiye alındıktan sonra bükme işlemleri gerçekleştirilen grup 6'da görülmektedir. Minimum geri esneme miktarı ise

çözeltiye alındıktan sonra bükülen ve daha sonra mikrodalga fırında yaşlandırılan grup 3'te elde edilmiştir. Ayrıca çözeltiye alındıktan sonra bükülen ve daha sonra geleneksel fırında yaşlandırılan grup 2'de gözlemlenen geri esneme miktarı ise grup 6'ya göre daha az olduğu tespit edilmiştir.



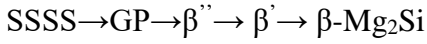
Şekil 9. Geri esneme-bükme açısı grafiği (numune grubu 5)



Şekil 10. Geri esneme-bükme açısı grafiği (numune grubu 6)

Yaşlandırıldıktan sonra bükme işlemine tabi tutulan grup 4-5'e ait grafikler Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde geleneksel fırında yaşlandırıldıktan sonra bükülen numunelere ait geri esneme miktarlarının, mikro dalga fırında yaşlandırıldıktan sonra bükülen numunelere ait geri esneme miktarından daha fazla olduğu görülmektedir.

Çalışmada kullanılan AA6061 alüminyum alaşımı yaşlandırılabilir bir alaşımdır ve mekanik özellikler çökeltme sertleşmesi ile kontrol edilebilir. Alaşımın mekanik özelliklerinin değişimi çökeltilerin erimesi ya da kabalaşması ile değişebilir. Al-Mg-Si alaşımlarında genellikle üretildiği varsayılan genel çökelti dizilimi aşağıdaki gibidir.



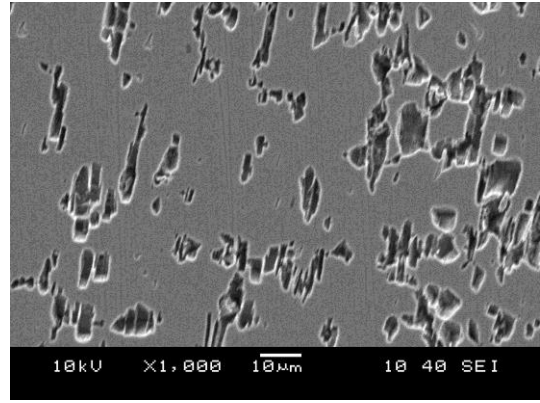
Bu çökeltilerin genellikle kabul edilen bileşimi Tablo 7’de verilmiştir. Literatürde suni olarak yaşlandırılmış AA6061-T6 alüminyum alaşımlarının ince çökelti ihtiva ettiği bilinmektedir. Bu çökelti β'' fazı olup bunlar iğne şeklindedir ve matrisin her üç $\langle 100 \rangle$ yönü boyunca yönelmiştir ve kısmen koherenttir (Maisonnette vd. 2011). Bilindiği üzere suni yaşlandırma işlemi dislokasyon yoğunluğunu azaltarak çökeltilerin şeklini ve büyüklüklerini değiştirmektedir (Li vd. 2016).

Tablo 7. AA6061 alüminyum alaşımında bulunan çökeltilerin bileşimi [Maisonnette vd. 2011].

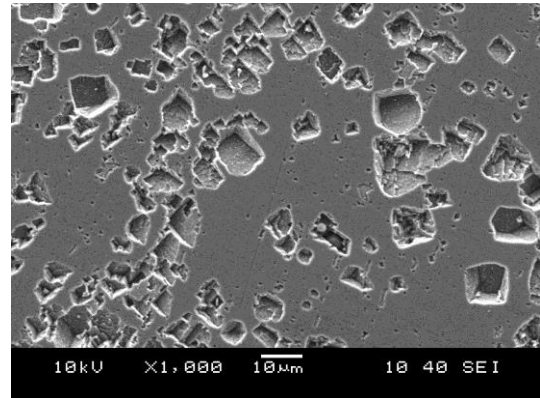
Faz	Bileşim
GP zone	Mg_1Si_1
β''	Mg_5Si_6
β'	Mg_9Si_5
β	Mg_2Si

Çalışmada kullanılan farklı malzeme gruplarına ait SEM analizleri Şekil 11-14’te verilmiştir. Şekil 11’de verilen içyapı literatürü destekler niteliktedir. Çökelti kısmen homojen dağılmış, küçük boyutlu ve yönlendirilmiştir. Fırında ısıtılma tabii tutulan numunelerde ise T6 şartına kıyasla çökeltilerin toparlandığı ve biraz yönlü olma durumlarını kaybettiği gözlemlenmektedir. Ayrıca literatürde yaklaşık 500-560°C gibi yüksek sıcaklıklarda çökeltilerin büyüyen çökeltiye yeniden dağıldığı, 300°C gibi daha düşük sıcaklıklara ısıtılarak gerçekleştirilen ısıtılma işlemlerinde ise çökelti boyutlarının küçüldüğü de belirtilmektedir (Maisonnette vd. 2011). Şekil 12’de çözültüye alınmış numunelere ait içyapı görülmektedir. Numuneler yüksek sıcaklıklarda işlem gördükleri için çökeltilerin boyutlarının büyüdüğü ve toparlanarak yönlü olma

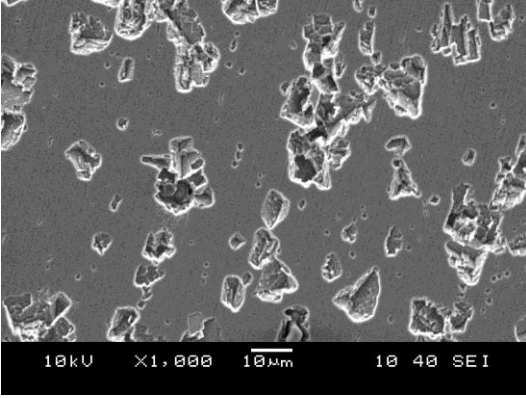
durumlarını kaybettiği gözlemlenmektedir. Şekil 13’te ise fırında ısıtılma işlemi görmüş numuneye ait içyapı görülmektedir. Şekilde çözültüye alındıktan sonra büyüyen çökeltilerin kısmen küçülmüş ve daha homojen olarak dağıldıkları görülmektedir. Mikrodalga fırında gerçekleştirilen ısıtılma işlemine ait içyapı ise Şekil 14’te verilmiştir. Mikrodalga fırında gerçekleştirilen işlemlerde ısıtılma hızının diğer işleme kıyasla yaklaşık 27 kat artması nedeniyle çözültüye alındıktan sonra büyüyen çökeltilerin oldukça küçüldüğü ancak dağılmaya zaman bulamadığı gözlemlenmektedir.



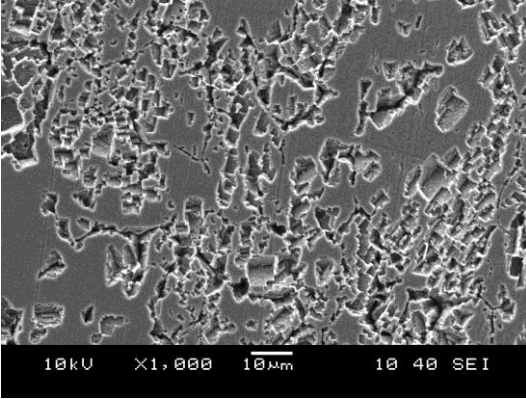
Şekil 11. AA6061-T6 koşullarına ait içyapı (temin edilen hal).



Şekil 12. Çözültüye alınmış AA6061 malzemeye ait içyapı.



Şekil 13. Geleneksel fırında yaşlandırılmış AA6061 malzemeye ait içyapı.



Şekil 14. Mikrodalga fırında yaşlandırılmış AA6061 malzemeye ait içyapı.

Sonuçlar ve Tartışma

Çalışmanın amacı, farklı mekanik özelliklerin malzemenin şekillendirilebilirliğine etkilerini incelemek olduğu için farklı ortam ve şartlarda numuneler ısıtılarak farklı mekanik özelliklere sahip numune grupları başarı ile elde edilmiştir. AA6061 alüminyum alaşımı malzeme T6 şartında temin edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda malzemenin maksimum çekme gerilmesinin yaklaşık 286.58 MPa olduğu belirlenmiştir. Malzemenin sertliği ise yaklaşık 60 HBN olarak ölçülmüştür. Numuneler geleneksel fırında çözeltiye alınmış ve maksimum çekme gerilmesinin yaklaşık %34.87, sertlik değerinin ise yaklaşık %35.83 azaldığı gözlemlenmiştir. Akabinde numuneler farklı ortamlarda yaşlandırılmıştır. Geleneksel fırında

yaşlandırılan numunelerin maksimum çekme gerilmesi değerleri yaklaşık %15.5, sertlik değerleri ise yaklaşık % 265 artar iken mikrodalga fırında yaşlandırılan numunelerin maksimum çekme değerlerinde yaklaşık %1.3, sertlik değerlerinde ise yaklaşık %132.47 artış tespit edilmiştir.

Bükme deneyleri sonucunda en büyük geri esneme miktarının, sertliği ve maksimum çekme gerilmesi en büyük olan numune grubunda elde edildiği belirlenmiştir. Çözeltiye alındıktan sonra bükülen numunelerde geri esneme miktarının diğer numune gruplarına göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan çözeltiye alındıktan sonra bükülen ve devamında yaşlandırılan numunelerin geri esneme miktarının çözeltiye alındıktan sonra bükülen devamında herhangi bir işlem görmeyen numune gruplarına kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni ise bükülmüş numunelerde kalan ve geri esnemeye sebep olan elastik gerilmelerin ısıtma işlemi sırasında azalması, malzemenin toparlanma için gerekli şart ve zamanı bulabilmesidir. Isıtma oranının malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisinin oldukça baskın olması nedeniyle, mikrodalga fırında yaşlandırıldıktan sonra bükülen numunelerde ölçülen geri esneme miktarının, geleneksel fırında yaşlandırıldıktan sonra bükülen numunelerde ölçülen geri esneme miktarından daha az olduğu belirlenmiştir. Zımba radüsü ile bükme açısının, tüm numune gruplarının geri esneme miktarı üzerindeki etkilerinin literatürdekiler ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir (Tekarslan vd. 2007, Ötü ve Demirci 2013).

AA6061 alüminyum alaşımı malzeme içerisinde bulunan çökeltilerin şeklinin ve boyutunun malzemenin mekanik özelliklerine etkide bulunduğu bilinmektedir. Yapılan içyapı incelemelerinde malzemenin temin edilen T6 kalitesinde çökelti boyutlarının küçük, yönelmiş ve homojen dağılımlı olduğu, malzeme çözeltiye alındıktan sonra çökeltilerin büyüdüğü ve yönelmiş olma halini kaybettikleri ve her iki ortamda da yaşlandırılan malzemelerde çökeltilerin boyut olarak küçüldüğü

gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı işlemlerde ısıtma hızının malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisinin oldukça baskın olduğu da tespit edilmiştir. Yüksek ısıtma oranlarında küçülen çökeltilerin dağılmaya vakit bulamadığı ve bu durumun malzemenin mekanik özelliklerini negatif yönde etkilediği belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmayı, 2015-061 nolu proje ile destekleyen Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Baseri H., Bakhshi-Jooybari, M., Rahmani. B., (2011). Modeling of Spring-Back in V-die Bending Process by Using Fuzzy Learning Back-propagation Algorithm, *Expert Systems with Applications*, 38, 8894–900.

Canteli J.A., Cantero ,J.L., Miguélez, M.H., (2009). Theoretical Analysis of Air Bending at High Temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1342–50.

Chatti S., (2010). Effect of the Elasticity Formulation in Finite Strain on Springback Prediction, *Computers and Structures*, 88, 796–805.

Gisario A. , . Barletta, M., Conti, C., Guarino, S., (2011). Springback Control in Sheet Metal Bending by Laser-Assisted Bending: Experimental Analysis, Empirical and Neural Network Modelling, *Optics and Lasers in Engineering*, 49, 1372–83.

He D., Li, D., Li, X., Jin, C., (2010). Optimization on Springback Reduction in Cold Stretch Forming of Titanium-Alloy Aircraft Skin. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 20, 2350-57.

Joseph, C.D., (2003). Experimental Measurement and Finite Element Simulation of Springback in Stamping Aluminium Alloy Sheets for Auto- Body Panel Application, (M. Sc.), Mississippi State University, Department of Mechanical Engineering.

Kahraman, M., (2008). Levha Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geri Esnemesinin İncelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kardes Sever N., Mete O. H., Demiralp Y., Choi C., Altan T., (2012). Springback prediction in bending of AHSS-DP 780, *Proceedings of NAMRI/SME*.

Li, L., Flores-Johnson, E.A., Shen, L., & Proust, G. (2016). Effects of heat treatment and strain rate on the microstructure and mechanical properties of 6061 Al alloy, *International Journal of Damage Mechanics*, 25(1), 26-41.

Lim H., Lee, M.G., Sung, J.H., Kim, J.H., Wagoner, R.H., (2012). Time-Dependent Springback of Advanced High Strength Steels, *International Journal of Plasticity*, 29, 42–59.

Ling Y.E., Lee, H.P., Cheok, B.T., (2005). Finite Element Analysis of Springback in L- bending of Sheet Metal, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 296-302.

Liu J.G., Fu, M.W., Lu, J., Chan, W.L., (2011). Influence of Size Effect on the Springback of Sheet Metal Foils in Microbending, *Computational Materials Science*, 50, 2604-14.

Longanathan D., Gnanavelbabu A., Rajkumar K., Ramadoss R., (2014). Effect of Microwave Heat Treatment on Mechanical Properties of AA6061 Sheet Metal, *Procedia Engineering* 97, 1692-1697.

Maisonnette, D., Suery, M., Nelias, D., Chaudet, P., & Epicier, T., (2011). Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a 6061 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2718-2724.

Meinders T., Burchitz, I.A., Bonte, .H.A., Lingbeek, R. A., (2008). Numerical Prudct Design: Springback Prediction, Compensation and Optimization, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 499-515.

Nasrollahi V., Arezoo, B., (2012). Prediction of Springback in Sheet Metal Components with Holes on the Bending Area, Using Experiments, Finite Element and Neural Networks, *Materials and Design*, 36, 331–6.

Ötü R., Demirci H. İ., (2013). Farklı Bükme Yöntemleri Uygulanarak V Bükme Kalıplarında AA 5754-O Sac Malzeme ile Elde Edilen Numunelerin Geri Esneme Miktarının Tespiti. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10, 27-42.

Panthen S.K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S.S., Goe, M.D., (2010). Finite Element Analysis of Sheet Metal Bending Process to Predict the Springback, *Materials and Design*, 31, 657–62.

- Réche D., Besson, J., Sturel, T., Lemoine, X., Gourgues-Lorenzon, A.F., (2012). Analysis of the Air-bending Test Using Finite-Element Simulation: Application to Steel Sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, 57, 43–53.
- Tekarslan Ö., Şeker U., Gerger N., (2007). Bükme Kalıplarında 0.75 mm Kalınlığındaki Çelik Sac Malzemenin Geri Esneme Miktarlarının Belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 13, 13-22.
- Toros S., Polat, A., Oztürk, F., (2012). Formability and Springback Characterization of TRIP800 Advanced High Strength Steel, *Materials and Design*, 41, 298–305.
- Vladimirov I. N., Pietryga, M.P., Reese, S., (2009). Prediction of Springback in Sheet Forming by a New Finite Strain Model with Nonlinear Kinematic and Isotropic Hardening, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4062–75.
- Wagoner R. H., Lim, H., Lee, M.G., (2013). Advanced Issues in Springback. *International Journal of Plasticity*, 45, 3-20.
- Zhang Q.F., Cai, Z.Y., Zhang, Y., Li, M.Z., (2013). Springback Compensation Method for Doubly Curved Plate in Multi-Point Forming, *Materials and Design*, 47, 377–385.

Investigation the effects of heat treatment on sheet metal forming of AA6061 aluminium alloy.

Extended abstract

Sheet metal forming processes, especially bending processes are widely used in automotive, packaging and home appliance industries. The springback is a major problem in the sheet metal process. The springback is a discrepancy between the loaded and unloaded geometries of product, due to elastic recovery of material. The main source of springback is material properties, which are hardness, microstructure, tensile and yield strengths. The present study aims to investigate the effect of aging on the springback properties of AA 6061 aluminium alloy sheet metal. The both conventional and microwave heat treatments were applied to one millimetre thick AA6061 aluminium alloy sheet metal for the mentioned purpose. Although there are many studies in the literature about predicting the amount of springback, trial and error method is still the most accurate method. Therefore, a modular bending tool that could be used in every firm and also used to have data about the maximum bending angle and the amount of springback of different type of sheet metal materials, experimentally. And also CNC milling machine were used with the modular bending tool for bending operations. A different process parameters such as heat treatment condition, bending angle and radius varied to study their effects on springback. On the other hand, image processing method has been used instead of the special measuring device which requires special devices and qualified employee.

AA6061 aluminium alloy was supplied in T6 condition. The tensile strength and hardness of material was about 286.58 MPa and about 60 HBN, respectively. The solution treatment was applied to specific sample groups and it was observed that tensile strength and hardness of material were increased about 34.87% and about 35.83%, respectively. Than the both conventional and microwave heat treatment was applied to sample groups and the results showed that the samples aged in conventional furnaces gave better results.

The ratio final bending angle to initial bending angle was defined as performance criteria. The final bending angle was measured by image processing method. The results showed that the amount of springback is greater when they compare to the

method used press brake. The maximum springback amount was measured in sample group that have the maximum tensile strength and hardness. The minimum springback amount was measured in-group that solution treated, bended and aged in microwave furnace, respectively. On the other hand, it is observed that, the springback angle of the sample group which bended after solution treated and then aged was smaller than springback angle of a group that only bended after solution treatment. The reason of the scenario is that during heat treatment, the material has time to require for recovery and the elastic stresses causing springback is reduced. Due to the heating rate in the heat treatment has a very dominant effect on the mechanical properties of the material, it is observed that the measuring springback angle of the sample group bended after aged in a microwave furnace is smaller than the measured springback angle of the sample group bended after aged in conventional furnace. Moreover, the bending tests showed that springback amount decreased with an increment of bending radius and angle in all sample groups.

It is known that the shape and size of precipitates in AA 6061 aluminium alloy influences the mechanical properties of material. The microstructure analyses showed that AA 6061-T6 material has small, oriented and homogeneous precipitates. The precipitates grown and became non-oriented, after solution treatment, Aging of solution treated samples decreased the precipitates sizes. Heating rate has a dominant effect on mechanical properties of material. It has determined that precipitates have no time to disperse at high heating rates.

Keywords: AA6061, microwave, heat treatment, sheet metal forming, springback