

Fiber Metal Laminatların Şekillendirilebilme Kabiliyetinin İncelenmesi

Ali İŞIKTAŞ^{*1}, Vedat TAŞKIN²

¹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Hayrabolu Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, 59400, Tekirdağ, Türkiye
²Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 22100, Edirne, Türkiye

(Alınış / Received: 13.02.2020, Kabul / Accepted: 09.09.2020, Online Yayınlanma / Published Online: 20.12.2020)

Anahtar Kelimeler

Şekillendirilebilirlik,
Fiber metal laminat,
Bükme kuvveti,
Karbon elyaf

Özet: Bu çalışmada, havacılık sektöründe kullanılan fiber metal laminatların (FML) şekillendirilebilme kabiliyeti deneysel olarak incelenmiştir. FML numunelerin alt ve üst tabakalarında iki farklı kalınlıkta (0,6 ve 1,2 mm) Al5754-H22 sac levhalar kullanılmıştır. FML numunelerin orta tabakasında prepreg karbon elyaf kumaştan üretilen karbon elyaf plaka bulunmaktadır. FML malzemelerin şekillendirilme kabiliyetini incelemek amacıyla numuneler farklı bükme açılarında şekillendirilmiştir. Deneyler sırasında 0,6 mm Al 5754 kullanılan FML numuneler tüm bükme açılarında şekillendirilirken, 1,2 mm Al 5754 kullanılan FML numunelerin 75° ve 90° bükme testlerinde ise numunelerin dış tarafındaki alüminyum tabakasında yırtılma hasarı görülmüştür. Ayrıca FML numunelerin şekillendirilmesinde, bükme açısı ve alüminyum tabaka kalınlığının artmasıyla bükme kuvveti değerinin arttığı tespit edilmiştir.

Investigation on Formability of Fiber Metal Laminates

Keywords

Formability,
Fiber metal laminate,
Bending force,
Carbon fiber

Abstract: In this study, the formability of fiber metal laminates (FML) used in aerospace industry were experimentally examined. Al5754-H22 sheets in two different thicknesses (0.6 and 1.2 mm) were used in top and bottom layers of FML specimens. Carbon fiber plates made of prepreg carbon fiber fabrics were placed in the middle layer of FML specimens. In order to examine the formability of FML materials, the specimens were formed in different bending angles. While all FML specimens with 0.6 mm Al 5754 were formed in all bending angles throughout the experiments, crack failures were observed in outer aluminum layer of the FML specimens with 1.2 mm Al 5754 at 75° and 90° bending angles. It was also reported in forming of FML specimens that the bending force value increased as the bending angle and the thickness of aluminum layer increased.

1. Giriş

Havacılık ve otomotiv endüstrisinde önemli avantajlar sunan fiber metal laminatların (FML) kullanımına ve imalatına artan bir ilgi bulunmaktadır [1]. Özellikle, havacılık sektöründe yüksek performanslı ve hafif yapılara olan talep nedeniyle fiber metal laminatların (FML) önemi artmıştır [2]. FML'ler metal malzemelerin yorulma ve hasar toleransını iyileştirmek amacıyla ince metal malzemeler ile fiber malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit malzemelerdir [3]. Metal ve fiber malzemelerin çeşitli kombinasyonlarla bir araya gelmesiyle oluşan fiber metal laminatlar geleneksel malzemelere göre üstünlük sağlamaktadır [4]. FML'lerin aynı kalınlıktaki yekpare alüminyum malzemeye göre yoğunluğu daha azdır [5]. Örneğin karbon elyaf-alüminyumdan oluşan hibrit bir

malzeme eşdeğer alüminyum malzemeye göre %56'ya kadar ağırlık tasarrufu sağlamaktadır [6,7]. Bu avantaj havacılık sektörü gibi ağırlığın önemli olduğu bir alanda daha fazla önem arz etmektedir. Ayrıca, FML'ler korozyon direnci ve nem direnci gibi çevresel etkilere karşı yekpare alüminyum malzemeye göre daha dayanıklıdır [8].

FML'lerin üretimi esnasında birçok şekillendirme ve kurlama aşamalarına gereksinim duyulmaktadır. Özellikle, karmaşık geometriye sahip FML'lerin üretilmesinde bu aşamalar yoğun işgücü ve pahalı işlemlere sebebiyet verdiği için maliyet artışına neden olmaktadır. Bu sebeple FML'lerin üretimi esnasında alternatif bir şekillendirme yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır [4]. Bu nedenle, FML malzemeler bu çalışmada sac metal şekillendirme prosesinde şekillendirilmiştir.

*İlgili yazar: aisiktas@nku.edu.tr

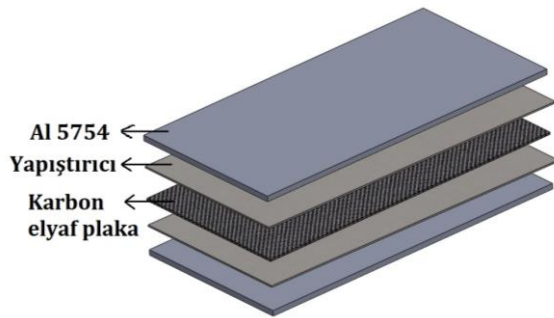
FML'lerin şekillendirilebilme kabiliyeti düşük olduğu için bükme işlemi esnasında malzemede çeşitli geometrik kusurlar meydana gelmektedir [2]. Yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde, FML'lerin şekillendirilmesi esnasında malzemelerde yırtılma, çatlama, deformasyon ve birleşme bölgesinden ayrılmalar görülmüştür [9-13].

Hahn ve arkadaşları, farklı fiber yönlerindeki FML malzemelerin farklı bükme sıcaklıklarında şekillendirilmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Düşük sıcaklıktaki bükme testlerinde, malzemelerin büküm bölgesi üzerinde yırtılma hasarı oluştuğunu belirtmişlerdir [14]. Uriya ve arkadaşları, fiber metal laminatların ve karbon elyaf plakaların farklı sıcaklıklarda şekillendirilmesini incelemiştir. Deneylerde, sıcaklığın artmasıyla fiber metal laminatların bükülebilme kabiliyetinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, sadece karbon fiberden oluşan deney numunelerinin bükülmesinde ise numune yüzeyinde yırtılma hasarının olduğu belirtilmiştir [15].

Fiber metal laminatların şekillendirilebilme kabiliyeti üzerine çalışmalar literatürde yer aldığı görülmüş, fakat farklı bükme açılarındaki davranışı henüz çalışılmamış olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple çalışmada, fiber metal laminatların farklı bükme açılarındaki şekillendirilebilme kabiliyeti araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

FML numunelerin alt ve üst tabakalarında iki farklı kalınlıkta (0,6 ve 1,2 mm) Al5754-H22 sac levhalar kullanılmıştır. FML numunelerin orta tabakasında ise 0,15 mm kalınlığında karbon elyaf plaka bulunmaktadır. Karbon elyaf plakasının üretiminde tek yönlü prepreg karbon elyaf kumaşlar kullanılmıştır. FML numuneyi oluşturan alüminyum sac, karbon elyaf plaka ve yapıştırıcının dizilimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Karbon elyaf kumaşın özellikleri Tablo 1'de, Al5754-H22'nin mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. FML yapının oluşum şeması.

Tablo 1. Karbon elyaf kumaşın özellikleri

| Dokuma türü | Elyaf ağırlığı (gr/m ²) | Reçine ağırlığı (gr/m ²) | Reçine oranı (%) | Elyaf kalınlığı (mm) |
|-------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------------|
|-------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------------|

| Plain | 93 | 107 | 35-37 | 0,15 |
|-------|----|-----|-------|------|
|-------|----|-----|-------|------|

Tablo 2. Alüminyum 5754-H22 kimyasal bileşimi (%)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | Cr |
|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| 0,40 | 0,40 | 0,10 | 0,50 | 3,2 | 0,20 | 0,15 | 0,30 |

Alüminyum ve karbon elyaf plakalar arasında daha iyi bir yapışma dayanımı elde etmek için mikroskobik yapışma alanını arttıran pürüzlendirme işlemi yapılmıştır [16]. Zımpara ile aşındırma işlemi esnasında yüzeylerde biriken alüminyum ve karbon elyaf tozlarını temizlemek için LPS marka Hdx temizleyici kullanılmıştır. Bu yüzey temizleyici solvent, zımparalama işlemi sırasında oluşan talaş, kir ve tozların yapıştırma yüzeyindeki gözenekleri doldurmasını engellemektedir [17].

Yapıştırma işlemi öncesi Devcon marka Metal Prep 90 primer kullanılmıştır. Metal Prep 90 alüminyum ve paslanmaz çelik yüzeylerde metakrilat bazlı yapıştırıcıların daha uzun süreli ve daha kalıcı yapışmasını sağlayan kimyasal bir primer ve yüzey düzenleyicidir [18]. Deneylerde bu primer, yapıştırılacak malzeme yüzeylerine ince bir katman halinde yüzeyi kaplayınca kadar püskürtülerek uygulanmıştır. Kullanılan primer oda sıcaklığında hızlı kuruma yaptığı için 3 dakika bekledikten sonra hemen yapıştırma işlemine geçilmiştir. Primer uygulanmış alüminyum levha yüzeyleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

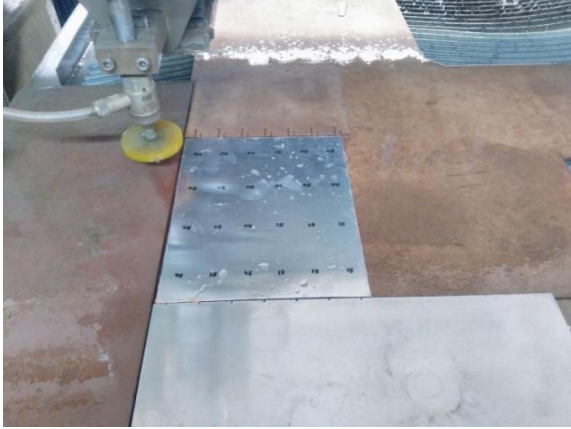


Şekil 2. Primer uygulanmış alüminyum levha yüzeyleri.

Alüminyum ve karbon elyafın yapıştırma işlemi, Devcon marka Plastic Welder yapıştırıcı kullanılmıştır. İki bileşenli olan yapıştırıcı ilk önce bir kaba boşaltılmış ve burada homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra, karıştırılan yapıştırıcı birleştirilecek parçaların yüzeylerine düzgün bir biçimde sürülmüştür. Yapıştırıcının oda sıcaklığında iyi bir yapıştırma mukavemetine sahip bir tabaka oluşturabilmesi için yapıştırılan malzemeler yapıştırma aparatı içinde 24 saat sabit basınç altında bekletilmiştir.

Yapıştırma işlemi sonrası 200x250 mm boyutlarındaki FML plakalar su jeti ile alüminyum sacın haddeme yönünde, 30x60 mm ebatlarında kesilerek deney numuneleri oluşturulmuştur. Su jeti

kullanıldığı için kesilen deney numunelerinin kenarlarında herhangi bir çapak meydana gelmemiştir. FML plakaların su jeti ile kesimi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. FML plakaların su jeti ile kesimi.

Su jeti ile kesme işlemi sonrası bükme deneylerinde kullanılan FML deney numuneleri Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. FML deney numuneleri.

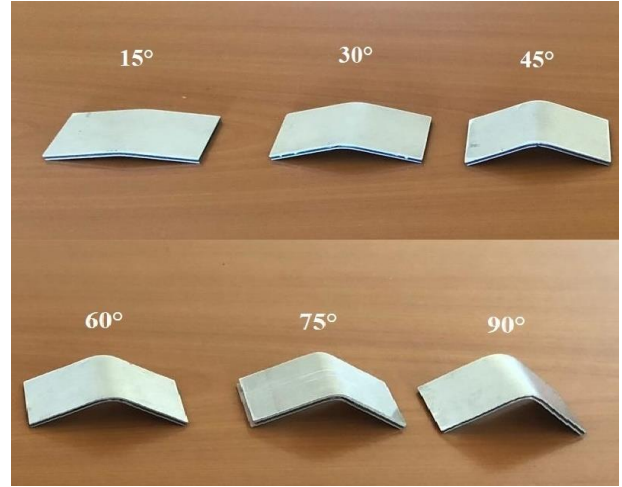
FML malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetini incelemek amacıyla numuneler farklı bükme açılarındaki şekillendirilmiştir. Deneylerde, FML numuneleri şekillendirmek için 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° bükme açılarındaki V bükme kalıpları kullanılmıştır. Yapılan deneylerde bükme hızı ve zımba yarıçapı sabit alınmıştır.

3. Bulgular

3.1. Bükme Açısının FML Malzemenin Şekillendirilmesi Üzerindeki Etkisi

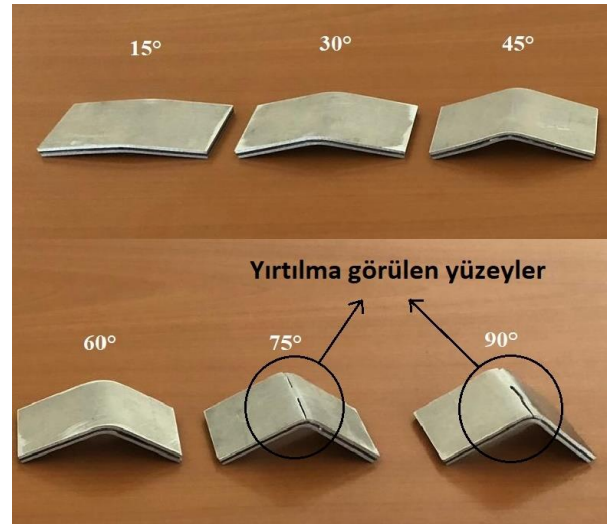
FML numunelerin orta tabakasında 0,15 mm kalınlığında karbon elyaf plakalar kullanılırken, alt ve üst tabakalarında ise iki farklı kalınlıkta (0,6 ve 1,2 mm) Al5754 sac kullanılmıştır. Üretilen FML numuneler 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° bükme açılarındaki şekillendirilmiştir. Bükme işlemi sonrası FML malzemelerin yapısı ve bükme kuvvetleri incelenmiştir.

0,6 mm Al5754 ve 0,15 mm kalınlığında karbon elyaf plakadan üretilen FML numunelerin bükme işlemi sonrası görünümleri Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. 0,6 mm Al 5754 ve 0,15 mm karbon elyaf plakadan üretilen FML numunelerin bükme sonrası görünümleri.

1,2 mm Al5754 ve 0,15 mm kalınlığında karbon elyaf plakadan üretilen FML numunelerin bükme işlemi sonrası görünümleri Şekil 6'da verilmiştir.



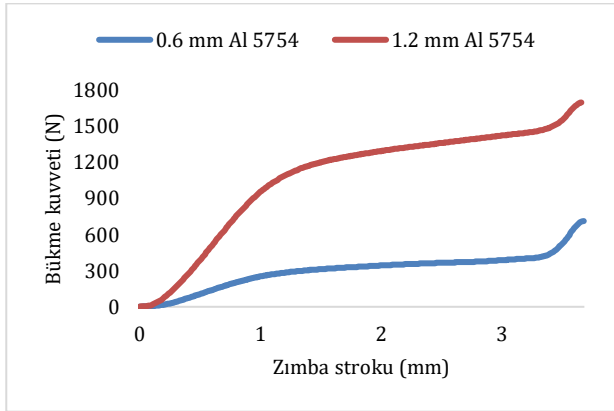
Şekil 6. 1,2 mm Al 5754 ve 0,15 mm karbon elyaf plakadan üretilen FML numunelerin bükme sonrası görünümleri.

Bükme işlemi sonunda 15°, 30°, 45°, 60° bükme açılarındaki numunelerde yırtılma hasarı görülmezken, 75° ve 90° bükülen numunelerin dış yüzeyindeki alüminyumlarda yırtılma hasarı oluşmuştur. 75° ve 90° bükülen numunelerde oluşan yırtılma hasarları Şekil 6'da gösterilmiştir. FML numunelerin şekillendirilmesinde, bükme açısının artması ile yırtılma hasarlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Bükme açısının artması, numunenin büküm bölgesinde oluşan gerilmeleri arttırmaktadır. Karbon elyaf ve alüminyum tabakaları kaymayacak şekilde bağlandığından, bu bükülme açılarındaki gelişen büyük arayüzey kesme gerilmeleri nedeniyle yırtılma hasarlarının meydana geldiği sonucuna varılabilir. Fiber metal laminatların şekillendirilmesi

neticesinde malzemenin dış yüzeyinde oluşan yırtılma hasarı benzer çalışmalarda da görülmüştür [19,20].

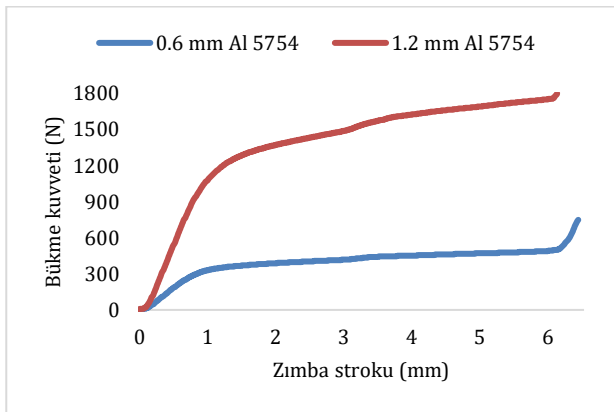
3.2. Bükme Açısı ve Alüminyum Kalınlığının Bükme Kuvveti Üzerindeki Etkisi

Deneylerin yapıldığı bükme cihazından alınan verilere göre, FML deney numunelerinin şekillendirilmesi için bükme kuvveti-zımba strok eğrileri oluşturulmuştur. Farklı kalınlıkta Al5754 kullanılan FML numunelerinin farklı bükme açıları için bükme kuvveti-zımba strok eğrileri Şekil 7-12'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Farklı kalınlıkta Al5754 kullanılan FML numunelerinin 15° bükme açısındaki bükme kuvvetleri.

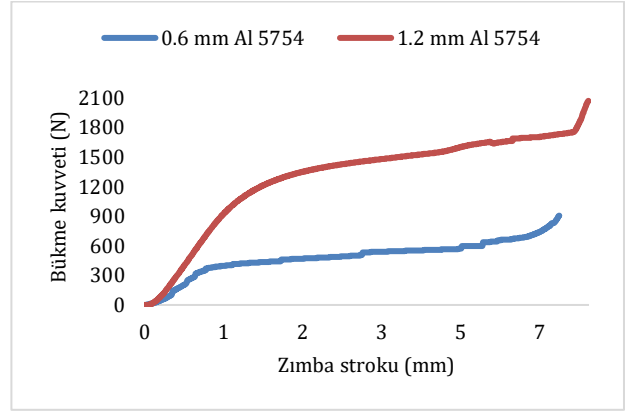
Şekil 7 incelendiğinde, 15°'lik bükme işleminde 0,6 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ortalama bükme kuvveti 708 N iken, 1,2 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ise 1692 N olarak ölçülmüştür.



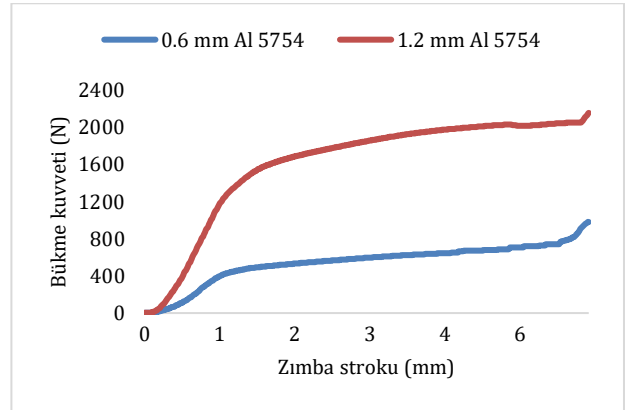
Şekil 8. Farklı kalınlıkta Al5754 kullanılan FML numunelerinin 30° bükme açısındaki bükme kuvvetleri.

Şekil 8 incelendiğinde, 30°'lik bükme işleminde 0,6 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ortalama bükme kuvveti 747 N iken, 1,2 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ise 1787 N olarak ölçülmüştür.

Şekil 9 incelendiğinde, 45°'lik bükme işleminde 0,6 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ortalama bükme kuvveti 904 N iken, 1,2 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ise 2066 N olarak ölçülmüştür.

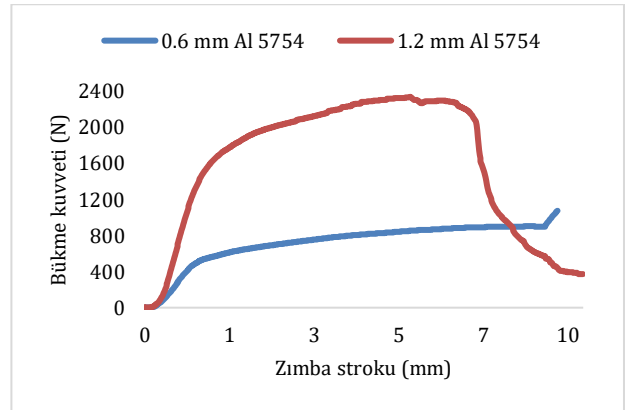


Şekil 9. Farklı kalınlıkta Al5754 kullanılan FML numunelerinin 45° bükme açısındaki bükme kuvvetleri.



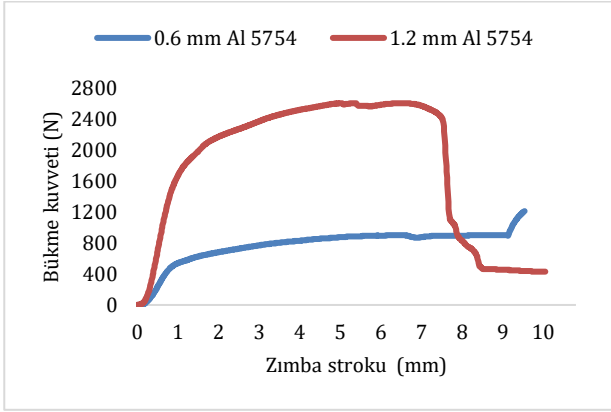
Şekil 10. Farklı kalınlıkta Al5754 kullanılan FML numunelerinin 60° bükme açısındaki bükme kuvvetleri.

Şekil 10 incelendiğinde, 60°'lik bükme işleminde 0,6 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ortalama bükme kuvveti 976 N iken, 1,2 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ise 2186 N olarak ölçülmüştür.



Şekil 11. Farklı kalınlıkta Al5754 kullanılan FML numunelerinin 75° bükme açısındaki bükme kuvvetleri.

Şekil 11 incelendiğinde, 75°'lik bükme işleminde 0,6 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ortalama bükme kuvveti 1068 N iken, 1,2 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ise malzemenin dış yüzeyindeki alüminyumda yırtılma hasarı meydana geldiği için bükme kuvvetinde 2326 N'dan sonra azalma görülmüştür.



Şekil 12. Farklı kalınlıkta Al5754 kullanılan FML numunelerin 90° bükme açısındaki bükme kuvvetleri

Şekil 12 incelendiğinde, 90°'lik bükme işleminde 0,6 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ortalama bükme kuvveti 1206 N iken 1,2 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde ise malzemenin dış yüzeyindeki alüminyumda yırtılma hasarı meydana geldiği için bükme kuvvetinde 2602 N'dan sonra azalma görülmüştür.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada karbon elyaf plaka ve alüminyum sac levhadan üretilen fiber metal laminatların şekillendirilme kabiliyeti incelenmiştir. Ayrıca, FML malzemelerin şekillendirilmesinde bükme kuvveti-zımba strok eğrileri analiz edilmiştir.

Farklı kalınlıkta (0,6 ve 1,2 mm) Al5754 kullanılan FML numunelerin farklı bükme açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) şekillendirilmesi esnasında, tüm bükme açılarında 1,2 mm Al5754 kullanılan FML numunelerde daha fazla bükme kuvveti gerektiği tespit edilmiştir.

0,6 mm Al5754 ve 0,15 mm kalınlığında karbon elyaf plakadan üretilen FML numunelerin farklı bükme açılarında şekillendirilmesi neticesinde, bükme açısının artması ile FML numunelerde (0,6/0,15/0,6 mm) bükme kuvveti değerinin arttığı tespit edilmiştir.

1,2 mm Al5754 ve 0,15 mm kalınlığında karbon elyaf plakadan üretilen FML numunelerin farklı bükme açılarında şekillendirilmesi neticesinde, bükme açısının artması ile FML numunelerde (1,2/0,15/1,2 mm) bükme kuvveti değerinin arttığı tespit edilmiştir.

1,2 mm Al5754 ve 0,15 mm kalınlığında karbon elyaf plakadan üretilen FML numunelerin şekillendirilmesi neticesinde; 15°, 30°, 45°, 60° bükme açılarındaki numunelerde yırtılma hasarı görülmezken, 75° ve 90° bükülen numunelerin dış yüzeyindeki alüminyumlarda yırtılma hasarı oluşmuştur. Karbon elyaf plaka ve Al sac tabakaları kaymayacak şekilde

bağlandığından, bu bükülme açılarındaki gelişen büyük arayüzey kesme gerilmeleri nedeniyle yırtılma hasarlarının meydana geldiği sonucuna varılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje numarası: 2017/185.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Reyes, G., Kang, H. 2007. Mechanical Behavior of Lightweight Thermoplastic Fiber-Metal Laminates. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 284-290.
- [2] Keipour, S., Gerdooei, M. 2019. Springback Behavior of Fiber Metal Laminates in Hat-Shaped Draw Bending Process: Experimental and Numerical Evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5-8), 1755-1765.
- [3] Şen, İ. 2015. Lay-up optimisation of fibre metal laminates: development of a design methodology for wing structures, Delft University of Technology, PhD Thesis, 61s, The Netherlands.
- [4] Mosse, L., Compston, P., Cantwell, W. J., Cardew-Hall, M., Kalyanasundaram, S. 2006. Stamp Forming of Polypropylene Based Fibre-Metal Laminates: The Effect of Process Variables on Formability. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2), 163-168.
- [5] Gülcan, O., Tekkanat, K., Çetinkaya, B. 2019. Fiber Metal Laminatlar ve Uçak Sanayiinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme. *Mühendis ve Makina*, 60(697), 262-288.
- [6] Kim, P. 1998. A Comparative Study of The Mechanical Performance and Cost of Metal, FRP, and Hybrid Beams. *Applied Composite Materials*, 5(3), 175-187.
- [7] Huang, Z., Sugiyama, S., Yanagimoto, J. 2013. Hybrid Joining Process for Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastic and Metallic Thin Sheets by Chemical Bonding and Plastic Deformation. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(11), 1864-1874.
- [8] Alderliesten, R. 2009. On The Development of Hybrid Material Concepts for Aircraft Structures. *Recent Patents on Engineering*, 3(1), 25-38.

- [9] Rajkumar, G. R., Krishna, M., Narasimhamurthy, H. N., Keshavamurthy, Y. C., Nataraj, J. R. 2014. Investigation of Tensile and Bending Behavior of Aluminum Based Hybrid Fiber Metal Laminates. *Procedia Materials Science*, 5, 60-68.
- [10] Khalili, S. M. R., Daghigh, V., Eslami Farsani, R. 2011. Mechanical Behavior of Basalt Fiber-Reinforced and Basalt Fiber Metal Laminate Composites under Tensile and Bending Loads. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(8), 647-659.
- [11] Wang, J., Yu, Y., Fu, C., Xiao, H., Wang, H., Zheng, X. 2020. Experimental Investigation of Clinching CFRP/Aluminum Alloy Sheet with Prepreg Sandwich Structure. *Journal of Materials Processing Technology*, 277, 116422.
- [12] Botelho, E. C., Silva, R. A., Pardini, L. C., Rezende, M. C. 2006. A Review on The Development and Properties of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures. *Materials Research*, 9(3), 247-256.
- [13] Kim, S. Y., Choi, W. J., Park, S. Y. 2007. Spring-Back Characteristics of Fiber Metal Laminate (GLARE) in Brake Forming Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(5-6), 445-451.
- [14] Hahn, M., Ben Khalifa, N., Weddeling, C., Shabaninejad, A. 2016. Springback Behavior of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Laminates with Metal Cover Layers in V-Die Bending. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(12), 1-10.
- [15] Uriya, Y., Ikeuch, K., Yanagimoto, J. 2014. Cold and Warm V-Bending Test for Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Sheet. *Procedia Engineering*, 81, 1633-1638.
- [16] Urkmez Taskin, N., Taskin, V., Sahin, A. 2016. Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Kesme Dayanımının İncelenmesi. 4th International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 11-13 Mayıs, Gaziantep, 1052-1059.
- [17] Işıktaş, A., Taşkın, V. 2020. Alüminyum-Karbon Elyaf Sandviç Kompozit Levhaların V-Bükme İşleminde Bükme Açılarının ve Bükme Yönlerinin Geri Esneme Üzerindeki Etkisi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 281-290.
- [18] Urkmez Taskin, N., Sahin, A. 2019. Effect of Aging Time at High Temperature on the Shear Strength of Adhesively Bonded Aluminum Composite Foam Joints. *The Journal of Adhesion*, 95(4), 308-324.
- [19] Uriya, Y., Yanagimoto, J. 2016. Suitable Structure of Thermosetting CFRP Sheet for Cold/Warm Forming. *International Journal of Material Forming*, 9(2), 243-252.
- [20] Yanagimoto, J., Ikeuchi, K. 2012. Sheet Forming Process of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Lightweight Parts. *CIRP annals*, 61(1), 247-250.