

Ilık Derin Çekme Prosesinde Yağlayıcı Etkisinin Şekillendirilebilirlik Açısından Deneysel Araştırılması

Nuri Şen^{1,*}, Naci KURGAN², İbrahim KARAAĞAÇ³, Onuralp ULUER³

^{1*} Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Karabük / TÜRKİYE

² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun / TÜRKİYE

³ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Ankara / TÜRKİYE

(Geliş / Received : 02.07.2015 ; Kabul / Accepted : 17.08.2015)

ÖZ

Derin çekme prosesinde yağlayıcı kullanılması şekillenme esnasında kalıp elemanları ve sac malzeme temas yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisini azaltmaktadır. Malzeme, kalıp ve baskı plakası yüzey kalitesi, sıcaklık, baskı plakası kuvveti ve kullanılan yağlayıcının özellikleri sürtünme kuvvetlerine etki eden faktörlerdir. Bu çalışmada; yüksek mukavemetli HC300LA (Erdemir 7128) ve HC420LA (Erdemir 7140) sac malzemelerinin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi sırasında kullanılan yağlayıcı türünün çekme oranına (DR) ve şekillendirme kuvvetine etkileri, deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, grafit sprej ve grafit sprej ile teflon (PTFE) bileşiminin birlikte kullanıldığı iki tür yağlayıcı kullanılmıştır. Yağlayıcı türü olarak grafit sprej ve teflon bileşimi kullanıldığında sürtünme kuvvetinin grafit sprej kullanımına oranla azaldığı ve bunun sonucu olarak da şekillendirme kuvvetinin de azaldığı gözlenmiştir. Yağlayıcı türüne bağlı olarak DR'nin HC300LA sac malzeme için en büyük % 11,26, HC420LA sac malzeme için de en büyük % 11,51 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ilık derin çekme, yağlayıcı, grafit sprej, teflon

An Experimental Investigation of the Lubrication Effects on Formability In Warm Deep Drawing Process

ABSTRACT

The lubrication reduces to effects of friction forces that it is between die and blank holder in deep drawing process. The affecting factors to friction forces are material, surface quality of die and blank holder, temperature, blank holder force and lubrication properties. In this study, the effects of lubricant type on drawing ratio (DR) and forming force have been investigated experimentally. Graphite spray and composition of graphite spray-Teflon (PTFE) materials were used as lubricant materials. Compared with the use of spray, in case of using graphite and Teflon spray composition as lubrication type, it was observed that friction force was decreased. As a result of this decrease, the forming force decreased. The depending on lubrication type, the DR increased maximum 11.26 % for HC300LA sheet material. Also, The DR increased maximum 11.51 % for HC420LA sheet material.

Keywords: Warm deep drawing, lubrication, graphite spray, Teflon

1- GİRİŞ (INTRODUCTION)

Derin çekme yönteminde sac malzeme üzerindeki sürtünmeden kaynaklı gerilmeler artmaktadır. Proses sırasında sac malzemenin kalıp içerisine akışı, sürtünmenin yoğunlaştığı yönde dururken, çekilen sacın az sürtünen diğer bölgelerde incelmeye meydana gelmekte ve prosesin ilerleyen aşamalarında da sac malzeme incelen bölgelerde yırtılmaktadır. Proses sırasında baskı plakası kuvveti sac malzemenin kırışma veya yırtılma olmaksızın kalıp içerisine akmasına izin verecek büyüklükte olmalıdır. Aksi takdirde yüksek baskı plakası kuvveti; sac malzemenin yırtılmasına sebep olurken az olması halinde de sac malzemede kırışıklık oluşarak yırtılmasına sebep olmaktadır. Proses sırasında en fazla sürtünme sac

malzeme-kalıp-baskı plakası arasında oluşmaktadır. Bu nedenle, kalıp ve baskı plakası arasında sürtünmeyi azaltmak amacıyla yağlayıcı kullanımı ve seçimi önemli bir parametredir. Uygun seçilmeyen yağlayıcı kullanımı sürtünme kaynaklı problemleri azaltmamaktadır. Ilık derin çekme proseslerinde yağlayıcı türünün sürtünme etkisini azaltmasının yanında bir de sıcaklık etkisiyle özelliğini kaybetmemesi de dikkat edilmesi gereken diğer bir parametredir. Şekillendirilen ürün açısından da değerlendirildiğinde, yağlayıcı malzeme ile sac arasındaki film tabaka şekillendirilen sac malzeme üzerinde bulunan çizik vb. şekillendirme kusurlarının oluşup oluşmamasını da etkilemektedir.

Literatür araştırmalarında, ılık derin çekme proseslerinde farklı özellikteki malzemelerin şekillendirilmesinde yağlayıcı olarak çeşitli malzemelerin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Zhang vd. yapmış oldukları çalışmada

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: nurisen1981@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.2 185-193

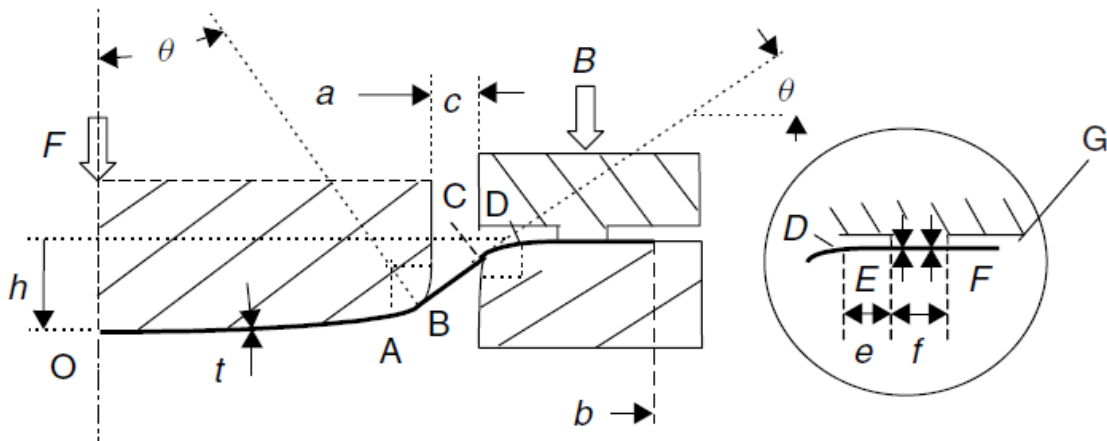
magnezyum alaşımlarının ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirme işlemlerinde sıvı teflon (PTFE) kullanmışlardır. Ancak sıvı teflonun sıcak şekillendirmede kolayca buharlaşmadığını ve kalıp üzerinde kalıntılar bıraktığını bildirmişlerdir [1]. Su bazlı teflon (PTFE) malzemesinin AZ31 magnezyum alaşımlarının da ılık şekillendirme prosesi ile şekillendirilmesinde de yağlayıcı olarak kullanıldığı belirlenmiştir [2]. Sıvı teflon malzemelerin yanı sıra teflon film malzemelerin de ılık derin çekme proseslerinde yağlayıcı olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Bong vd. yaptıkları çalışmada östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesinde teflon film malzemesini yağlayıcı olarak kullanmışlardır [3]. Alüminyum sac malzemelerin ılık şekillendirme prosesinde sıcaklık artışı ile birlikte Alüminyum sac malzemedeki yapışmaya eğilimi ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı artan sürtünme ile birlikte şekillendirilebilirlik azalmaktadır [4]. Palumbo ve Tricarico dairesel alüminyum alaşımlarının ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesinde yağlayıcı olarak standart gres yağını kullanmışlardır [5]. Kumar vd. 7000 serisi Alüminyum malzemenin ılık derin çekme yöntemiyle

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, ılık derin çekme prosesi ile ilgili çalışmalarda sac malzemelerin şekillendirilebilirliği ve şekillendirilebilirliğe etki eden sıcaklık, baskı plakası kuvveti, malzeme türü ve hız parametreleri üzerine odaklanıldığı tespit edilmiştir. Ancak, yağlayıcı etkisi en az diğer parametreler kadar önemli olan yağlayıcı ve türü üzerinde araştırma bulunmadığı sadece yağlayıcı etkisinin sonraki çalışmalarda araştırılmasının planlandığı belirlenmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada ilk kez sadece yağlayıcının şekillendirilebilirliğe etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, yağlayıcı malzeme olarak ilk kez bu çalışmada, grafit ve grafit-teflon bileşimi malzemeler kullanılmıştır.

2- YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Derin Çekme İşleminde Sürtünme Kuvveti (Friction Force in Deep Drawing)

Çekme kalıbında çekme kuvvetinin etkisini açıklamak için, bir çekme kalıbının kesit görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Kesitin simetrik olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 1. Çekme kalıbı kesit görüntüsü [13] (The section view of drawing die)

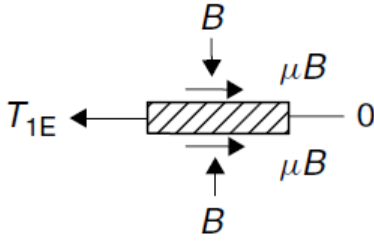
miyle şekillendirilebilirliğini araştırdığı çalışmasında, Multidraw Drylube C1 ticari marka yağlayıcı kullanmıştır [6]. Başka bir çalışmada da yine 7000 serisi Alüminyum sac malzemenin şekillendirilmesi sırasında, Wang vd. yüksek sıcaklığa dayanıklı Fuchs ticari marka AL278 yağlayıcı kullanmışlardır [7]. Ayrıca gres malzemesinin başka çalışmalarda da ılık şekillendirme işlemlerinde yağlayıcı olarak kullanıldığı belirlenmiştir [8]. Laurent vd. magnezyum alaşımlarının ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi prosesinde yağlayıcı malzeme olarak sıvı yağ kullanmışlardır. Sıvı yağ uygulamasını sac malzemenin her iki yüzeyine sürerek yapmışlardır [9]. Kotkunde vd. Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesinde Molykote ticari marka yağlayıcı kullanmıştır [10]. Literatür araştırmalarında, yağlayıcı malzeme olarak makine yağı ve boron nitride gibi farklı malzemelerin de kullanıldığı tespit edilmiştir [11, 12].

Şekil 1'de; a zımba yarıçapını, b sac yarıçapını, c çekme boşluğunu, e baskı plakası ile kalıp kavisi arasında kalan alanı, f baskı yatığı baskı alanını, h parça derinliğini ve t sac kalınlığını ifade etmektedir.

Şekil 1'de verilen sac malzemenin deformasyonunda, sac malzeme O merkezinden B teğet noktasına gerdirilmekte ve sac malzeme sürtünmeye zıt yönde kaymaktadır. Bu esnada sac malzeme üzerindeki sürtünme kuvveti ise O merkez noktasına zıt yönde hareket etmektedir. Ayrıca sac malzeme, kalıp ile temas noktası olan C noktasından F noktasına da kaymaktadır.

Derin çekme işleminde, zımba ve baskı plakası arasında sac malzeme üzerine gelen kuvvetler Şekil 2'de verilmiştir. Burada, T_{IE} çekme kuvvetini ve B baskı plakası kuvvetini ifade etmektedir. Bir çekme kalıbında, sürtünme kuvveti (μB) sac malzemenin her iki yüzeyine etkilemektedir. Çekme kalıbında deformasyon esnasında meydana gelen çekme gerilmesinin hesaplaması Eş.1'de verilmiştir.

$$T_{1E} = 2\mu B$$



Şekil 2. Baskı plakası altında sac malzeme [8] (The sheet under the blank-holder)

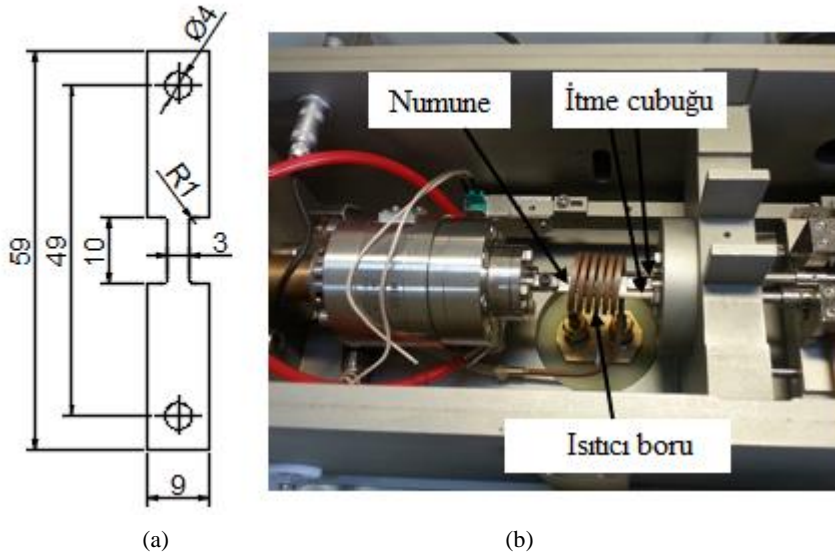
2.2. Malzeme (Materials)

Deneysel çalışmalarda, HC300LA ve HC420LA sac malzemeler kullanılmıştır. Sac malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme test numuneleri Şekil 3 (a) 'da verildiği gibi tel erozyon tezgahında kesilerek

(1) oda sıcaklığında (RT), 150 °C ve 300 °C sıcaklıklarında çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme cihazının görüntüsü Şekil 3(b) 'de, elde edilen veriler de Tablo 1 'de verilmiştir. Deney malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları da Tablo 2 'de verilmiştir.

2.3. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Ilık derin çekme deneyleri, Şekil 4 'de verilen 80 ton kapasiteli mekanik eksantrik pres üzerine kurulan ve yüksek sıcaklıklar için özel olarak tasarlanan deney düzeneginde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneginde kullanılan baskı plakası kuvveti, eksantrik presin her iki tarafında bulunan ve özel olarak imal edilen her biri 50 kN kapasiteli iki adet piston vasıtasıyla sağlanmıştır. Yük hücresi, zımba ve pres koçunun arasına Şekil 4 'de verildiği gibi monte edilmiştir. Yük hücresinden alınan veriler, derin çekme işlemi boyunca pres tarafından uygulanan kuvvetin bilgisayar ekranında gösteriminin



Şekil 3. a) Çekme testi numunesi ölçüleri, b) dilatometre cihazının üstten görünüşü
(a- Tension sample geometry, b- top view of dilatometer assembly)

Çizelge 1. HC300LA sac malzeme çekme testi sonuçları (The tensile test results of HC300LA sheet materials)

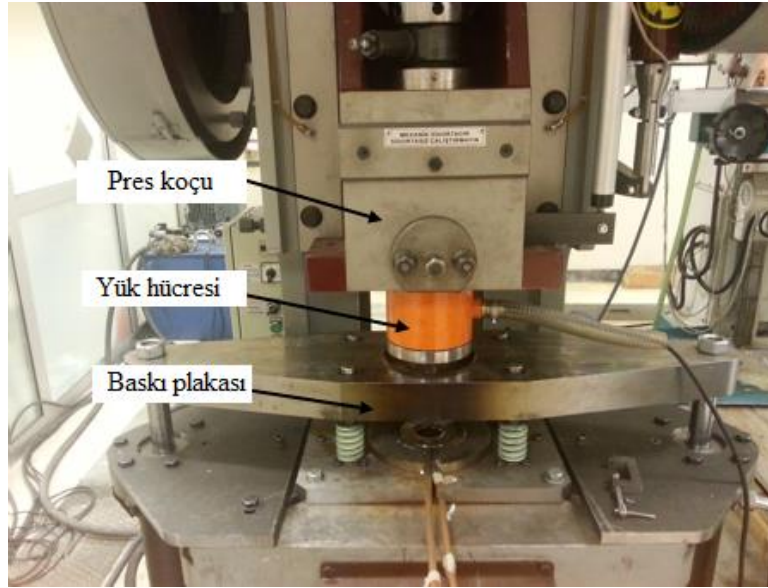
Malzeme	Sıcaklık (°C)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Pekleşme üsteli (n)	Dayanım sabiti (K)
7128	RT	357	507	0,13	792
	150	320	427	0,12	695
	300	265	429	0,13	728
7140	RT	460	657	0,14	1019
	150	400	525	0,09	921
	300	320	537	0,10	886

Çizelge 2. HC300LA kalite çeliği sac malzemelerin kimyasal bileşimi (Ağırlık %) (Chemical composition of HC300LA sheet material (Weight %))

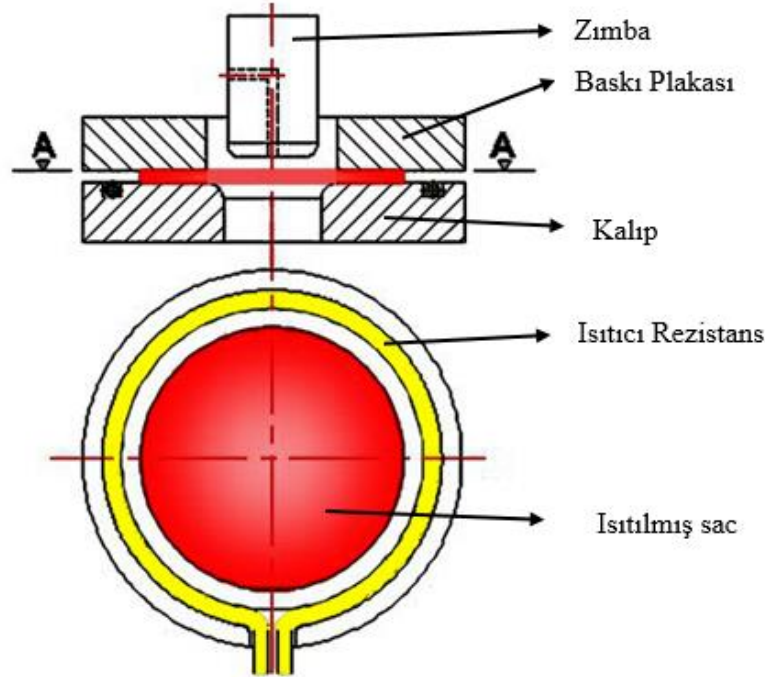
Çelik Kalitesi	C	Mn	Si	Al	Ti
HC300LA	0.03	0.25	0.004	0.05	<0.001
HC420LA	0.07	1.24	0.01	0.06	0.01

sağlanmasında ve kayıt edilmesinde kullanılmaktadır. Yük hücresinin kapasitesi 1000 kN dur. Deney düzeneğinin şematik gösterimi de Şekil 5’de verilmiştir

İkinci aşamada; ılık derin çekme deneylerinde grafit sprej yağlayıcı kullanılarak çekilemeyen deney numunesinden başlayarak, teflon (PTFE) ve grafit sprej yağlayıcının birlikte kullanıldığı derin çekme deneyleri ger-



Şekil 4. Deney düzeneği (Experimental Setup)



Şekil 5. Deney düzeneği şematik gösterimi (Schematic presentation of experimental setup)

DeneySEL çalışmaların ilk aşamasında, ılık derin çekme deneyleri grafit (sprej) yağlayıcı kullanılarak başlanmış ve DR belirlenmiştir. İlk derin çekme deneyleri grafit (sprej) yağlayıcı kullanılmaya devam edilerek deney numunesi çekilemeye kadar dENEYSel çalışma devam etmiştir. Grafit sprej uygulaması, zımba temas bölgesi dışında kalan tüm yüzeylere (alt-üst) elle uygulanmıştır.

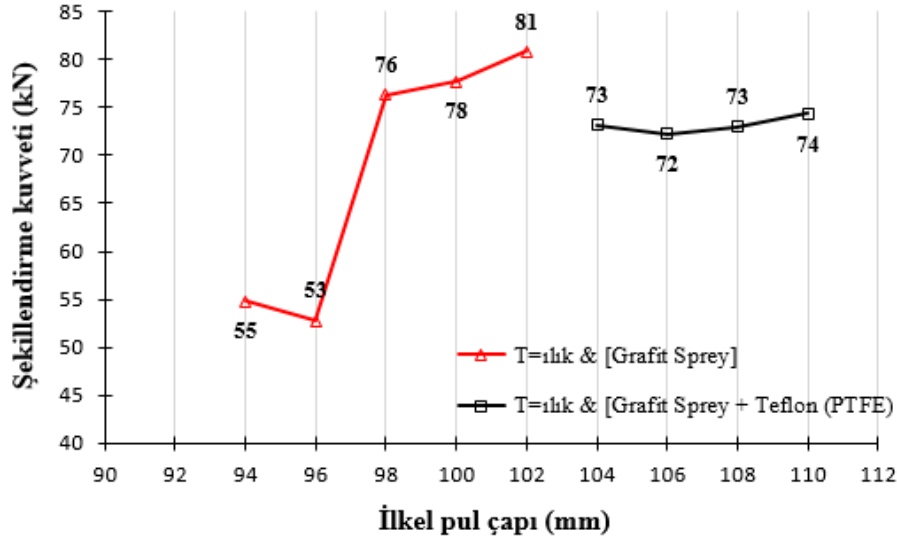
çEKLEŞTİRİLMİŞTİR. Burada; grafit sprej yağlayıcı, deney malzemesinin zımba temas bölgesi hariç (flaş) bölgeye önce elle uygulanmıştır. Daha sonra 0,3 mm kalınlığındaki zımba temas bölgesi çıkartılarak hazırlanan teflon film malzemesi, deney malzemesinin alt ve üstüne konulmuş ve dENEYSel çalışmalar yapılmıştır. Buradaki film haldeki teflon malzeme, baskı plakası ile deney malzemesinin arasındaki sürtünmeyi, grafit ise teflon film malzeme ile deney malzemesi arasındaki sürtünmeyi minimize ederek şekillendirilebilirliği arttırmıştır.

3- BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

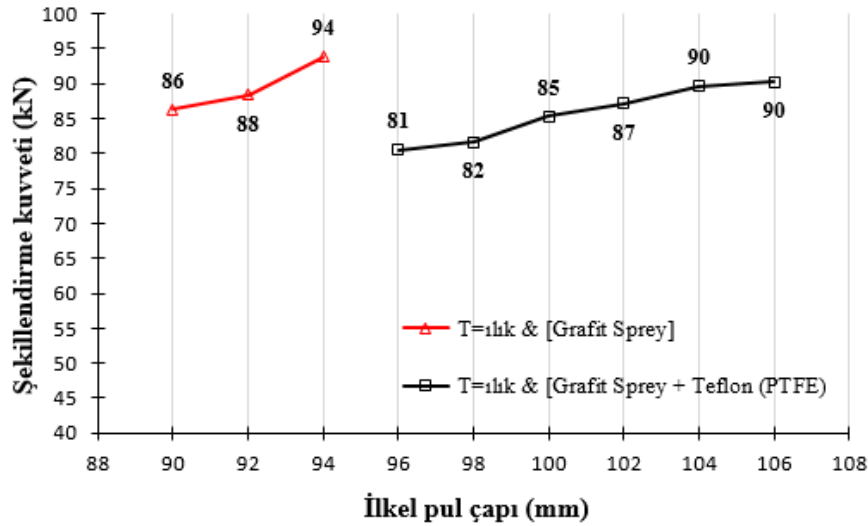
Deneysel çalışmalarda, öncelikle HC300LA sac malzemenin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilebilirliğine yağlayıcının etkisi araştırılmıştır. Her iki yağlayıcı türünde de şekillendirme kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Grafit sprej yağlayıcı kullanarak yapılan ılık derin çekme deneylerinde, 1,2 mm sac kalınlığı için en büyük 102 mm çaplı ilkel pul

kaynaklanmaktadır. HC300LA sac malzeme için yağlayıcı tiplerine göre ilkel pul çapı şekillendirme kuvveti ilişkileri Şekil 6'da verilmiştir.

1,5 mm kalınlıkta HC300LA sac malzeme için yapılan ılık derin çekme deneylerinde, grafit sprej yağlayıcı kullanılarak 94 mm ilkel pul çaplı sac malzeme 94 kN kuvvetle şekillendirilebilmiştir. Yağlayıcının grafit sprej ve teflon birlikte kullanılması durumunda 106 mm ilkel pul çaplı sac malzeme 90 kN kuvvetle



Şekil 6. HC300LA $t=1,2$ mm için, Şekillendirme kuvveti-İlkel pul çapı grafiği (Forming force vs blank diameter graphs for HC300LA $t=1,2$ mm)



Şekil 7. HC300LA $t=1,5$ mm için, Şekillendirme kuvveti-İlkel pul çapı grafiği (Forming force vs blank diameter graphs for HC300LA $t=1,5$ mm)

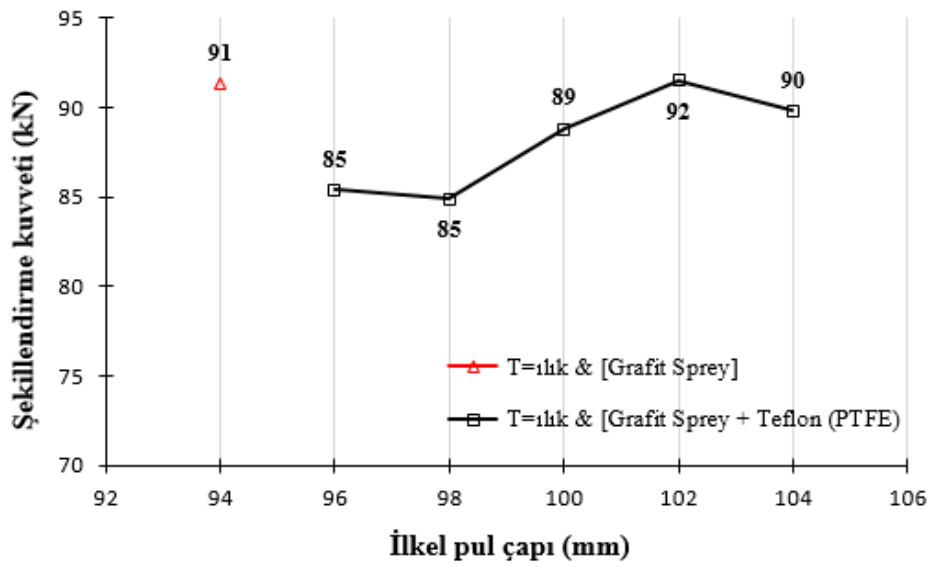
çaplı sac malzeme 81 kN kuvvetle şekillendirilebilirken, grafit sprej ve teflon yağlayıcının birlikte kullanıldığı deneylerde 110 mm çaplı ilkel pul çaplı sac malzemenin 74 kN kuvvetle şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Daha büyük ilkel pul çaplı sac malzemenin daha düşük kuvvetle şekillendirilmesi, yağlayıcının sürtünme kuvvetini azaltarak sac malzemenin daha düşük kuvvetlerde şekillendirilmesine imkan tanınmasından

şekillendirilebilmiştir. İlkel pul çapının artmasına rağmen şekillendirme kuvvetinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durum yağlayıcının etkisiyle sürtünme kuvvetinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Şekillendirme kuvveti ile ilkel pul çapı ilişkisi Şekil 7'de verilmiştir.

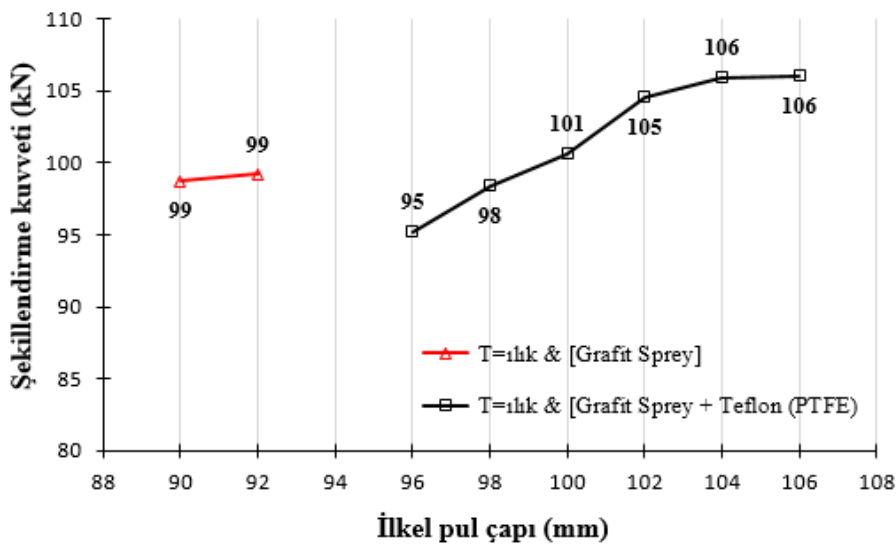
HC420LA sac malzemenin ılık derin çekme deneylerinde de yağlayıcının sadece grafit sprej kullanımı yerine grafit sprej ve teflon malzemesinin birlikte kullanılması durumunda HC300LA sac malzemede olduğu gibi şekillendirme kuvvetinin ilkel pul çapı artmasına rağmen düştüğü gözlemlenmiştir. HC420LA sac malzeme için 1,2 mm kalınlıkta 94 mm ilkel pul çapında 91 kN şekillendirme kuvveti gözlemlenirken, 104 mm ilkel pul çapında 90 kN şekillendirme kuvveti gözlemlenmiştir. 1,5 mm sac kalınlığında 92 mm ilkel pul çapında 99 kN şekillendirme kuvveti gözlemlenirken, 96 mm ilkel pul çapında 95 kN şekillendirme kuvveti gözlemlenmiştir. Şekillendirme kuvveti ilkel pul çapı ilişkileri 1,2 mm kalınlık için Şekil 8’de, 1,5 mm kalınlık için Şekil 9’da

verilmiştir.

Deneyel çalışmalarda yağlayıcı türünün çekme oranına etkileri araştırılmıştır. 1,2 mm kalınlıkta HC300LA sac malzeme grafit sprej yağlayıcı kullanıldığında en fazla 2,42 çekme oranında şekillendirilebilirken, grafit sprej ve teflon kullanıldığında en fazla 2,61 çekme oranında şekillendirilebilmiştir. 1,5 mm kalınlıkta numunelerde ise yağlayıcının grafit sprej den grafit sprej ve teflonun birlikte kullanımına değiştirilmesiyle çekme oranı 2,30’dan 2,59’a çıkmıştır. Yağlayıcının şekillendirilebilirliğe etkisi belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. İkel pul çapı çekme oranı ilişkileri Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.

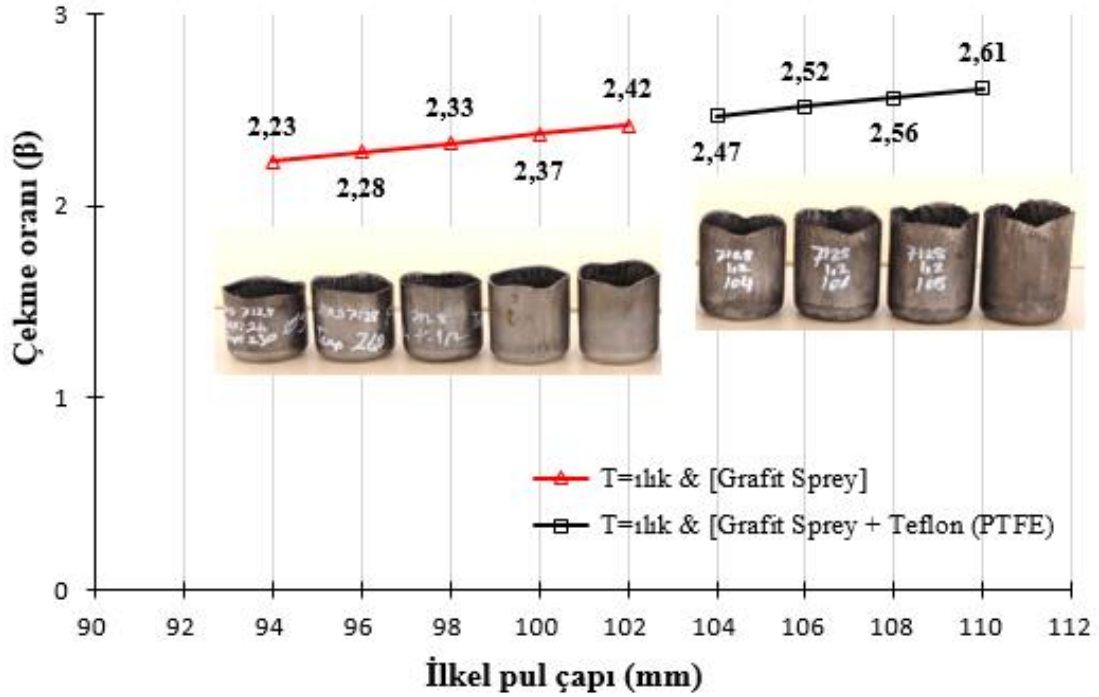


Şekil 8. HC420LA $t=1,2$ mm için, Şekillendirme kuvveti-İkel pul çapı grafiği (Forming force vs blank diameter graphs for HC420LA $t=1,2$ mm)

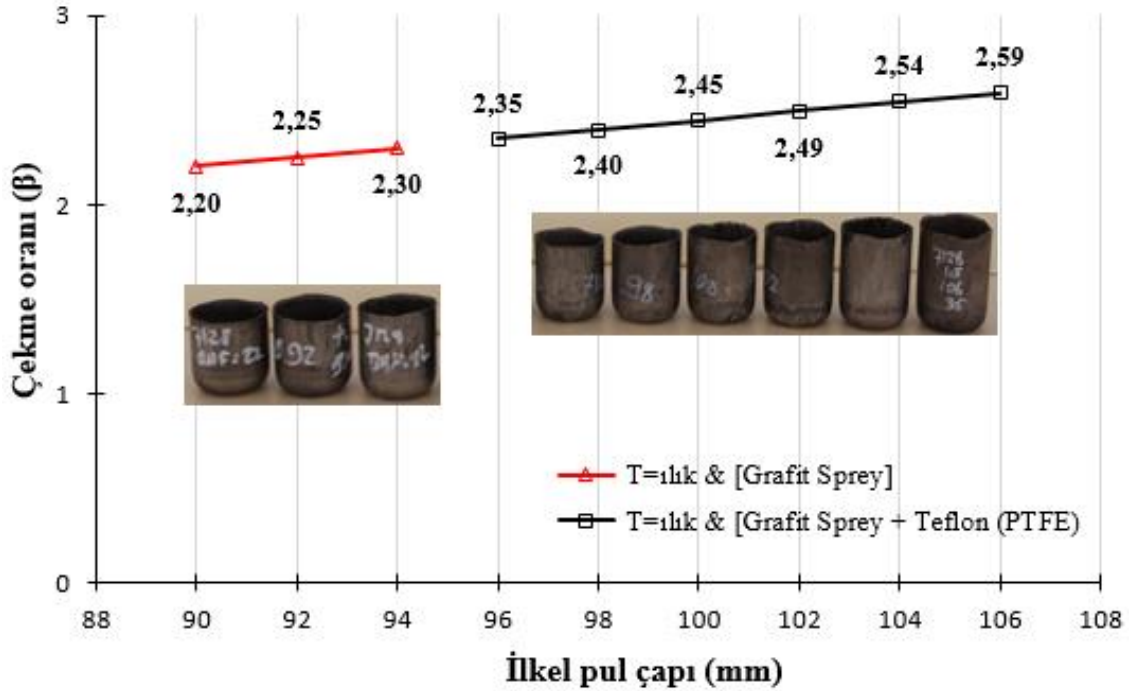


Şekil 9. HC420LA $t=1,5$ mm için, Şekillendirme kuvveti-İkel pul çapı grafiği (Forming force vs blank diameter graphs for HC420LA $t=1,5$ mm)

sprey ve teflonun birlikte kullanılmasıyla 2,47'ye



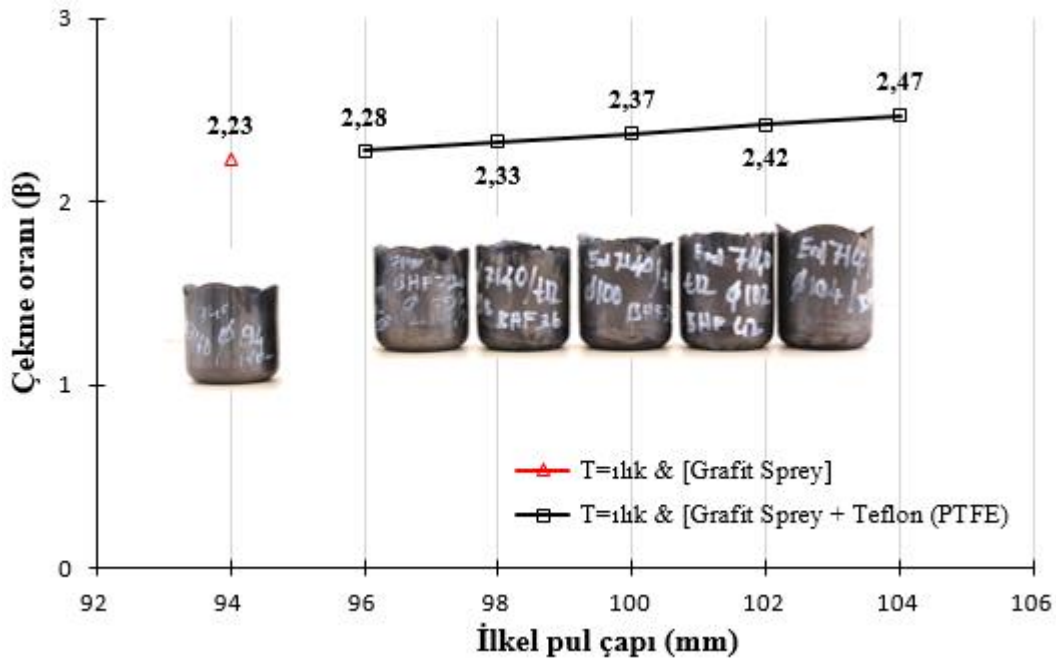
Şekil 10. HC300LA t=1,2 mm için, Çekme oranı-İlkel pul çapı grafiği (Drawing ratio vs blank diameter graphs for HC300LA t=1,2 mm)



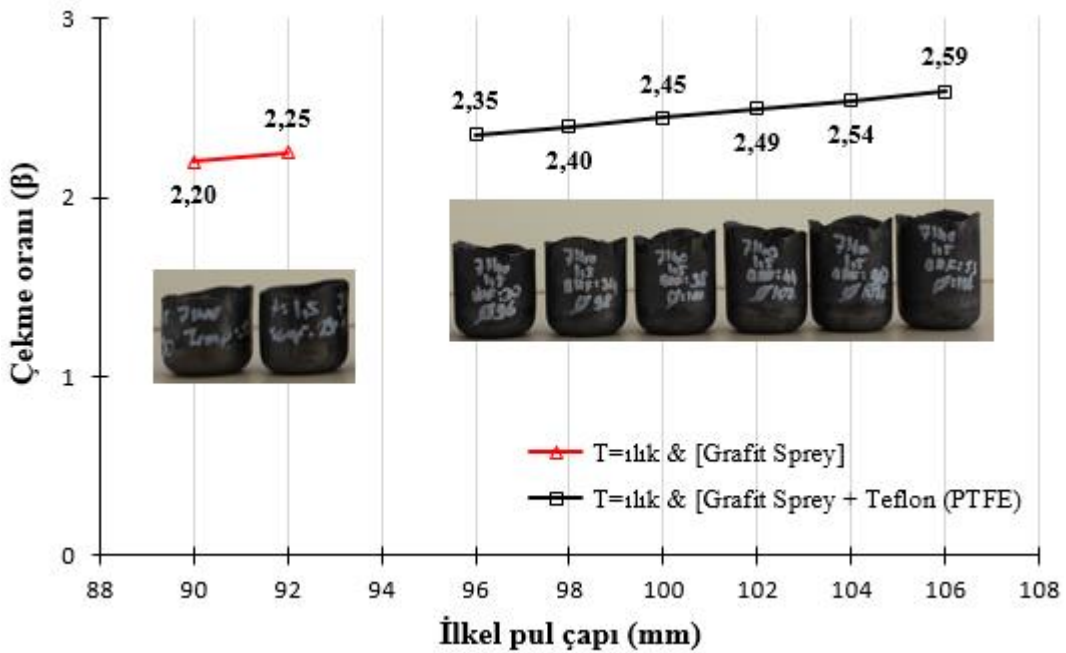
Şekil 11. HC300LA t=1,5 mm için, Çekme oranı-İlkel pul çapı grafiği (Drawing ratio vs blank diameter graphs for HC300LA t=1,5 mm)

HC420LA sac malzeme türü için de yağlayıcının çekme oranına etkisi deneysel çalışmalarda belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. 1,2 mm sac kalınlığı için grafit sprej kullanımı ile 2,23 olan çekme oranı yağlayıcının grafit

yükselmiştir. 1,5 mm sac kalınlığı için de yağlayıcı değişimi ile çekme oranı 2,25'den 2,59'a yükselmiştir. HC420LA sac malzeme için çekme oranı ilkel pul çapı ilişkileri Şekil 12 ve Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 12. HC420LA t=1,2 mm için, Çekme oranı-İlkel pul çapı grafiği (Drawing ratio vs blank diameter graphs for HC420LA t=1,2 mm)



Şekil 13. HC420LA t=1,5 mm için, Çekme oranı-İlkel pul çapı grafiği (Drawing ratio vs blank diameter graphs for HC420LA t=1,5 mm)

4- SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, yüksek mukavemetli HC300LA ve HC420LA sac malzemelerinin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesinde şekillendirme kuvveti ve çekme oranı üzerine yağlayıcı türünün etkileri deneysel olarak araştırılmış ve şu bulgular elde edilmiştir.

1. ılık derin çekme deneylerinde grafit sprej yağlayıcı kullanılması durumunda HC300LA

sac malzemesi için 1,2 mm kalınlıkta çekme oranı 2,42, 1,5 mm kalınlıkta çekme oranı 2,30 elde edilmiştir. Grafit sprej ve teflon malzemesinin birlikte yağlayıcı olarak kullanılması durumunda ise 1,2 mm kalınlıkta çekme oranı 2,61'e, 1,5 mm kalınlıkta çekme oranı 2,59'a artmıştır.

2. HC420LA sac malzeme için çekme oranı grafit sprej olan yağlayıcının grafit sprej ve teflon malzemesi olarak değiştirilmesiyle, 1,2 mm

kalınlıkta 2,33 olan çekme oranı 2,47'ye, 2,25 olan çekme oranı da 2,59'a artmıştır.

3. İlık derin çekme yönteminde ilkel pul çapının artmasına rağmen yağlayıcı tipinin grafit spreyden grafit sprey ve teflon malzeme birlikte kullanımına değiştirilmesiyle şekillendirme kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma; Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü tarafından KBÜ-BAP-13/2-Dr-017 kod numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz. Ayrıca, Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme ve Mükemmeliyet Merkezi (MŞMM) ve personeline de deneysel çalışmaya verdikleri katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERNCES)

- [1] S. H. Zhang, K. Zhang, Y. C. Xu, Z. T. Wang, Y. Xu, and Z. G. Wang, "Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures," *J. Mater. Process. Technol.*, 185(1-3): 147-151, (2007).
- [2] Q.-F. Chang, D.-Y. Li, Y.-H. Peng, and X.-Q. Zeng, "Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 47(3-4): 436-443, (2007).
- [3] H. J. Bong, F. Barlat, D. C. Ahn, H. Y. Kim, and M. G. Lee, "Formability of austenitic and ferritic stainless steels at warm forming temperature," *Int. J. Mech. Sci.*, 75: 94-109, (2013).
- [4] J. Lade, B. N. Banoth, A. K. Gupta, and S. K. Singh, "Metallurgical Studies of Austenitic Stainless Steel 304 under Warm Deep Drawing," *J. Iron Steel Res. Int.*, 21(12): 1147-1151, (2014).
- [5] G. Palumbo and L. Tricarico, "Numerical and experimental investigations on the Warm Deep Drawing process of circular aluminum alloy specimens," *J. Mater. Process. Technol.*, 184(1-3): 115-123, (2007).
- [6] M. Kumar, N. Sotirov, and C. M. Chimani, "Investigations on warm forming of AW-7020-T6 alloy sheet," *J. Mater. Process. Technol.*, 214(8): 1769-1776, 2014.
- [7] H. Wang, Y. Luo, P. Friedman, M. Chen, and L. Gao, "Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22(1): 1-7, (2012).
- [8] G. Ambrogio, L. Filice, G. Palumbo, and S. Pinto, "Prediction of formability extension in deep drawing when superimposing a thermal gradient," *J. Mater. Process. Technol.*, 162-163(SPEC. ISS.): 454-460, (2005).
- [9] H. Laurent, J. Coër, P. Y. Manach, M. C. Oliveira, and L. F. Menezes, "Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy," *Int. J. Mech. Sci.*, 93: 59-72, (2015).
- [10] N. Kotkunde, A. D. Deole, A. K. Gupta, S. K. Singh, and B. Aditya, "Failure and formability studies in warm deep drawing of Ti-6Al-4V alloy," *Mater. Des.*, 60: 540-547, (2014).
- [11] H. Takuda, K. Mori, T. Masachika, E. Yamazaki, and Y. Watanabe, "Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing," *J. Mater. Process. Technol.*, 143-144(1): 242-248, (2003).
- [12] E. Odenberger, "Material Characterisation for Analyses of Titanium Sheet Metal Forming," *Thesis*, (2005).
- [13] Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu, "Mechanics of sheet metal forming," *Exp. Mech.*, 16(9): 337-342, (2002).