



Yağlama durumunun DC01 çelik sac malzemenin artışı şekillendirilmesine etkilerinin incelenmesi

Elif MALYER*

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Manisa
elif.malyer@cbu.edu.tr ORCID: 0000-0001-9141-3842, Tel: (236) 312 48 88 (143)

Hikmet Sadi MÜFTÜOĞLU

Trom Trafo ve Radyatör San.ve Tic. A.Ş., Sakarya
hikmetsadimuftuoglu@gmail.com

Geliş: 29.11.2018, Revizyon: 18.03.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

Öz

Çalışmada, DC01 çelik alaşımı sac malzemenin Artışlı Şekillendirme Yöntemi (AŞY) ile biçimlendirilmesinde yağlama elemanının performansını araştırmaya odaklanılmıştır. Bilindiği üzere AŞY’nde, işlemin ısı kaynağı sürtünmedir. Takım-sac malzeme temas alanı ile temas alanının sabit kaldığı durumlarda devir sayısı sürtünme ısısını kontrol etmektedir. Yağlama elemanlarının AŞY ile biçimlendirilen ürünün kalitesine etkisini açıklamak için çalışmada ayrıca bahsi geçen iki parametrenin de ürün kalitesine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, dört farklı duvar açısına sahip kesik koni formu AŞY ile işlenmiş ve devir sayısı, takım çapı ve yağlama elemanı deney değişkeni olarak belirlenmiştir. % incelleme miktarı ve geometrik tamlik performans ölçütü olarak belirlenmiştir. Üretilen parçaların CAD verilerinin elde edilebilmesi için 3D lazer tarama yöntemi kullanılmış ve veriler üzerinde ürünlerin duvar açıları ve kalınlıkları ölçülmüştür. Hedef geometrinin duvar açısı ile ürünün duvar açısı arasındaki fark geometrik tamlik, sac malzemenin ilk ve son kalınlıkları arasındaki fark ise % incelleme miktarı olarak tanımlanmıştır. Deneyler sonuçları, işlem sıcaklığının düşük olduğu şartlarda yağlama özelliği daha iyi olan yağlama elemanının hem % incelleme hem de geometrik tamlik bakımından daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Artışlı şekillendirme, yağlayıcı, hız faktörü, incelleme miktarı, geometrik tamlik.

* Yazışmaların yapılacağı yazar

şekillendirme esnasında parça üzerine gelen yükler kaldırıldıktan sonra ürünün geometrisi ve ölçüsünde değişikliklere neden olan elastik deformasyondur ki bu olay geri esneme olarak adlandırılır [7]. Klasik sac metal şekillendirme yöntemlerinde olduğu gibi bu yöntemde de tamamen önlenemez ama en aza indirilmesi söz konusudur [8]. Klasik sac metal şekillendirme işlemlerinde geri esneme, ürün geometrisine, sac metal malzemenin özelliklerine ve parça ile takım arasındaki yağlama durumuna göre değişmektedir [9, 10].

Karaağaç ve Özdemir DC01 çeliğinin hidromekanik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı kalınlıklarda DC01 çeliği kullanarak sac malzeme kalınlığı, ilkel sac çapı, kalıp içi basıncı ve kalıp kavisi parametrelerinin, çekme oranı, çekme kuvveti, güç tüketimi ve şekillendirilen ürünün et kalınlığı değişimine etkileri deneysel olarak belirlenmişlerdir. Kalıp içi basıncının adı geçen malzemenin hidromekanik şekillendirme işleminde en önemli etken olduğunu tespit etmişlerdir. Sistemin doğasından kaynaklanan yağlama işlemi ile yırtılma olmaksızın daha büyük derinliklerin elde edilebildiğini ortaya koymuşlardır [11]. Köhler ve ark ise farklı sürelerle ısıtma işlemi uyguladıkları 50µm kalınlığındaki DC01 çeliği ile çekme işlemi gerçekleştirmişler ve malzeme tane boyutu ve soğuk şekillendirme işlemi olan çekme işleminin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Isıtma süresi uzadıkça tane boyutunun arttığını ve akma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir [12].

Literatürde yağlama durumunun sac malzemenin belirtilen yöntem ile şekillendirilebilirliğine etkilerinin incelendiği çalışmalar diğerlerine göre daha azdır. Aynı şekilde DC01 çeliklerinin şekillendirilebilirlik özelliklerinin incelendiği az sayıda çalışma bulunmasına karşın bu çeliklerin artışı şekillendirilmesinde yağlama durumunun nihai ürünün özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu nedenlerden dolayı çalışmada yağlama elemanı olarak AŞY ile ilgili deneylerde sıklıkla

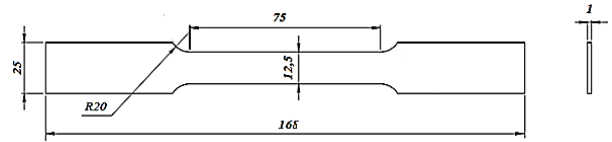
kullanılan bor yağları ile AŞY'nin derin çekme ve sıvama işlemlerinin kombinasyonu olarak değerlendirilmesinden dolayı iki farklı derin çekme ve sıvama yağları tercih edilmiştir. Yağlama elemanının yanı sıra form verme sırasında sürtünme şartlarına ve işlem sıcaklığına etkide bulunacak olan takım çapı ve devir sayısı da işlem değişkeni olarak kullanılarak günümüzde imalat sektöründe sıklıkla kullanılan DC01 çeliğinin yine bahsi geçen sektörde kullanılan artışı şekillendirme işlemi ile şekillendirilebilirliğinin incelenmesi ve yağlama şartlarının AŞY ile şekillendirme sürecine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Materyal ve Yöntem

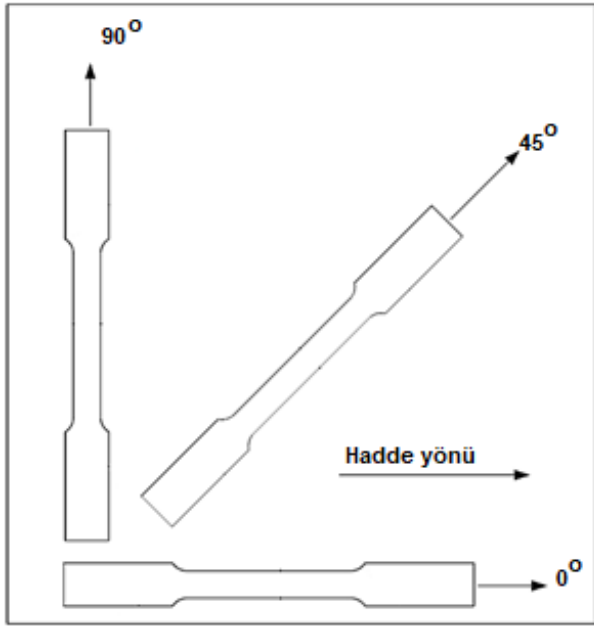
Deneysel çalışmalarda, Tablo 1'de kimyasal içeriği verilen, 1mm kalınlığındaki DC01 çelik sac malzeme kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için 1mm kalınlığındaki malzemeden ASTM E8-M standardına uygun ölçülerde, lazer kesme yöntemi ile 9 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme numunelerinin imalat resmi Şekil 2'de, numunelerin çıkarılma düzeninin detaylı gösterimi ise Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 1. DC01 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (%ağırlık)

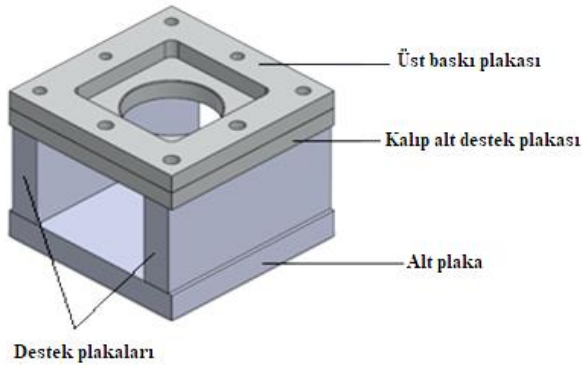
C	0.025
Mn	0.182
P	0.009
S	0.007
Si	0.003
Al	0.032



Şekil 2. Çekme test numunesinin imalat resmi (ölçüler mm)



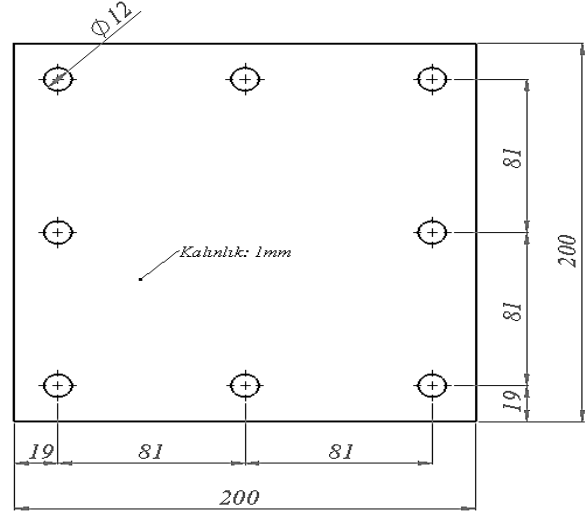
Şekil 3. Çekme test numunelerinin sac malzeme üzerindeki yerleşim planı.



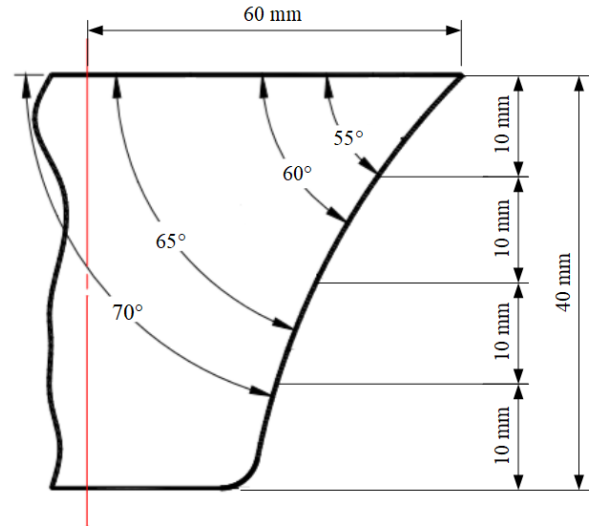
Şekil 4. Bağlama kalıbının CAD modeli.

Şekillendirme işlemleri için Negatif Tek Noktadan Temas ile Artışlı Sac Metal Şekillendirme yöntemi tercih edilmiş ve bu amaçla, Şekil 4'te CAD modeli verilen, bağlama kalıbı tasarlanarak imal edilmiştir. Bağlama kalıbı, Fanuc kontrol ünitesine sahip FIRST MCV-300 dik işleme merkezine komparatör yardımıyla bağlandıktan sonra daha önceden lazer kesme yöntemi ile hazırlanmış deney numuneleri bağlama kalıbının alt destek plakası ile üst baskı plakası arasına sabitlenmiştir. Deney numunelerinin imalat resmi Şekil 5'te, AŞY ile şekillendirme sonunda elde edilecek hedef geometri Şekil 6'da verilmiştir. Sac metal deney numunelerinin üst yüzeyinin merkezi iş parçası

sıfır noktası olarak belirlenmiştir. Artışlı şekillendirme işlemleri için UGNX3 CAD/CAM yazılımı kullanılarak helisel takım yolları türetilmiştir.



Şekil 5. Deney numunelerinin teknik resmi.



Şekil 6. Kesik koni formun detaylı görünüşü.

Çalışmada, yağlama şartlarının AŞY ile şekillendirilebilirliğe etkilerini incelemek amacıyla form verme sırasında sürtünme şartlarına ve işlem sıcaklığına etkiye bulunacak olan yağlama elemanı, takım çapı ve devir sayısı işlem değişkeni olarak kullanılmıştır. Deneylere ait işlem parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Bor yağının artışlı şekillendirme işlemleri ile ilgili deneysel çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Bu nedenle, bor yağı çalışmada ilk tercih edilen yağlama elemanı olmuştur. Diğer

tanımlanabileceğinden, çalışmada iki farklı çekme ve sıvama yağı kullanılmıştır. Bunlardan ilki Drawtex AC'dir. Bu yağ, özel kaydırıcılar ve EP katkıları ile korozyon önleyici yandan artışı sac metal şekillendirme işlemi derin çekme ve sıvama işlemlerinin bileşimi olarak katkıları içeren bir derin çekme ve sıvama yağıdır. Çok zor olan derin çekme ve sıvama işlemlerinde su ile karıştırılmadan kullanılır. Diğeri ise Renol EP/AC'dir. Bu, yağlama özelliği yüksek, derin çekme ve sıvama gibi zor operasyonlarda su karıştırılarak kullanılan özel metal işleme sıvısıdır.

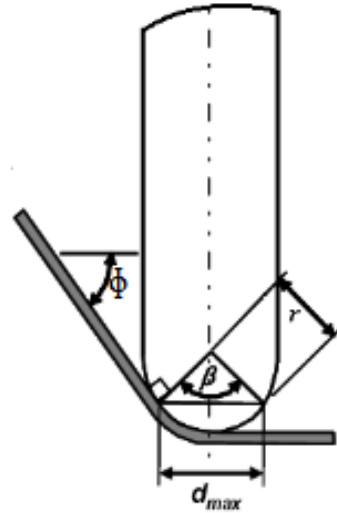
Tablo 2. Artışı sac metal şekillendirme işlemi için takım yolu üretiminde kullanılan şekillendirme parametreleri

Parametreler	Değerler
Düşey adım, h (mm)	0,5
İlerleme miktarı v, (mm/min)	500
Devir Sayısı w, (rpm)	250, 500, 1000
Takım çapı, d (mm)	5, 10, 20
Yağlama elemanı	Bor yağı, Drawtex AC, Renol EP/AC

Çalışmanın amacı, farklı karakterdeki yağlama elemanlarının, sac metal ürünler arasında yaygın olarak yer alan DC01 çeliğinin AŞY ile biçimlendirilebilirliğini incelemektir. Yağlama elemanı takım-sac malzeme temas yüzeyindeki sürtünme şartlarına etki eder. Yağlama elemanın etkilerini daha sağlıklı inceleyebilmek için belirtilen şartlara etki eden diğer faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörlerden biri de numunenin belirli bir noktadaki duvar açısıdır. Şekillendirilen duvar açısı değiştikçe takım-sac malzeme temas alanı da değişmektedir. Bu alanı değiştiren diğer bir faktör de takım çapıdır. Jeswiet ve ark. çalışmalarında takım-sac malzeme temas alanı ile takım çapı, duvar açısı arasındaki ilişkiyi açıklamışlardır. Şekil 7'de bu ilişki şematik olarak verilmektedir. Şekle göre takımın saca temas eden kısmının hesaplanması aşağıdaki eşitliklerde belirtilmiştir.

Değişkenlerin tanımları Şekil 7'de belirtilmiştir. Eş. 3 kullanılarak farklı takım çapları ve duvar açıları için takım-sac malzeme temas yüzeyi

hesaplanabilir. AŞY'nde en önemli ısı kaynağı sürtünmedir [13]. Sac malzeme-takım temas alanını değiştirmese de bahsi geçen bölgede sürtünme ısısını kontrol eden diğer bir faktör ise devir sayısıdır. AŞY'nde devir sayısı ya sıfır seçilebilir ki bu durumda takım kendi eksenine etrafında dairesel hareket gerçekleştirmez ya da devir sayısı olarak herhangi bir sayısal değer atanabilir. Jeswiet ve ark. çalışmalarında ilk koşul ile elde edilen ürünlerin yüzey kalitesinin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir [13]. İkinci koşulda ise bu değişkenin kontrolü şekillendirme süresince meydana gelen ısının kontrolü anlamına gelmektedir. Şekillendirme sırasında takım ile sac malzeme arasındaki bağıl hareket azaltılarak işlem sıcaklığı da azaltılabilir. Diğer yandan bazı şartlarda devir sayısı artırılarak şekillendirilebilirlik de iyileştirilebilir [13].



Şekil 7. Takım-sac malzeme temas alanı [13].

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$c = d_{max},$$

$$a = b = r,$$

$$\beta = 2\phi \quad \text{ise}$$

$$d_{maz} = r \cdot \sqrt{2(1 - \cos \beta)} \quad (2)$$

$$\bar{d} = r \cdot \sqrt{\frac{1}{2} (1 - \cos 2\phi)} \quad (3)$$

Tüm bu nedenler ile AŞY ile şekillendirme deneylerinde, yağlama elemanı ile birlikte takım çapı ve devir sayısı da işlem değişkeni olarak kullanılmıştır. Diğer yandan, çalışmada, deney sayısını arttırmadan duvar açısının etkisini de inceleyebilmek için literatürde sıklıkla kullanıldığı üzere tek bir duvar açısına sahip bir geometri yerine Şekil 6'da da görüldüğü üzere duvar açısının farklı bölgelerde farklı değerler aldığı bir hedef geometri tercih edilmiştir.

Şekillendirme işlemleri sonucunda elde edilen numuneler 3D lazer tarayıcı ile taranmış her bir numuneden elde edilen .STL dosyalarından numunelere ait CAD dataları elde edilmiştir. CAD verileri üzerinden numunelerin duvar açıları ve duvar kalınlıkları ölçülmüştür. Başarı ölçütleri belirlenirken, geometrik tamlık ve % incelme miktarı esas alınmıştır. Şekillendirilen formun farklı duvar açısına sahip her bir bölgesinin duvar açısı ile hedef geometrinin duvar açıları karşılaştırılmış ve aradaki fark geometrik tamlık olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan numunelerin duvar bölgelerindeki kalınlık değişimleri her bir farklı bölge göz önüne alınarak ölçülmüş ve sonuçlar sac malzemenin ilk kalınlığına oranlanarak % incelme miktarı tespit edilmiştir.

Sonuçlar ve Tartışma

Çekme deneyleri sonucu elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve % uzama miktarları Tablo 3'te, çekme deneylerinin işlenmesi ile elde edilen malzemenin mekanik özelliklerine ait bilgileri Tablo 4'te verilmiştir.

Çapı 5mm takım ve Renol EP/AC yağlama elemanı kullanılarak şekillendirilen numunelerde deney tekrar sayısı arttırılsa da takımın sürekli kırılması nedeniyle hedef geometriye ulaşamamıştır. Belirtilenler haricinde diğer tüm değişkenler ile hasarsız numuneler elde edilmiştir.

AŞY ile ilgili çalışmaların genelinde kullanıldığı üzere öncelikle çapı 10 mm olan takım ile bor yağ kullanıldığı şartlarda devir sayısının

şekillendirme sonrasında elde edilen numunenin duvar açısına etkisi incelendiğinde devir sayısının özellikle duvar açısının büyük olduğu şartlarda belirgin bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Duvar açısının 70° olduğu bölgede numune ile hedef geometrinin duvar açısı arasındaki minimum farkın yaklaşık 1,4°, maksimum farkın ise yaklaşık 2,6° olduğu, minimum farkın devir sayısının 250 rpm, maksimum farkın ise devir sayısının 1000 rpm seçildiği koşullarda elde edildiği gözlemlenmiştir. Duvar açısının 65° olduğu bölgede ise sonuçların 70°'lik bölge ile benzerlik gösterdiği saptanmıştır. Duvar açısının 60° olduğu bölgede minimum ve maksimum farkların sırasıyla yaklaşık 6° ve 9° olduğu belirlenmiştir. Bahsi geçen bölgede numunelerin şekillendirilmesinde kullanılan devir sayısının etkilerinin daha belirgin olduğu görülmüştür. $\phi=55^\circ$ bölgesinde, numune ile hedef geometrinin duvar açıları arasındaki minimum ve maksimum farkların ise sırasıyla yaklaşık 13,5° ve 22,8° olduğu saptanmıştır. Sonuçları gösteren grafik Şekil 8'de verilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere geometrik tamlık değerlerinin $\phi=70^\circ-60^\circ$ olduğu şartlarda, devir sayısındaki artış ile doğru orantılı değiştiği, $\phi=55^\circ$ bölgesinde değişimin bu tespite uymadığı belirlenmiştir.

Tablo 3. Maksimum çekme gerilmesi ve %uzama değerleri.

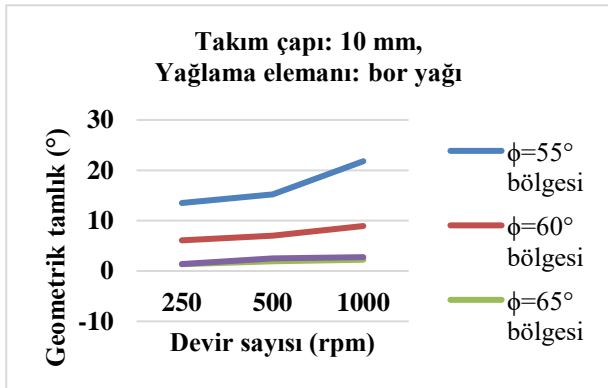
DC01	Hadde Yönü		
	0°	45°	90°
	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)		
1. Test	306,75	318,75	303,75
2. Test	294,5	296,25	302,500
3. Test	321,00	320,81	307,500
% uzama			
1. Test	19,7289	20,7484	16,3881
2. Test	26,9370	15,7177	21,4984
3. Test	22,91	16,7812	20,86,95

Takım çapının şekillendirilebilirliğe etkisine incelemek amacıyla devir sayısının 500 rpm seçildiği ve bor yağının kullanıldığı koşullarda

geometrik tamlık sonuçları incelendiğinde, en iyi sonucun çapı 20 mm olan takım ile elde edildiği görülmektedir. Belirtilen şartlarda konuya ait genel sonuçları gösteren grafik Şekil 9’da verilmiştir. Grafik incelendiğinde takım çapının geometrik tamlığa, şekillendirilecek formun duvar açısının büyük olduğu şartlarda, belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Diğer yandan duvar açısı azaldıkça takım çapı-geometrik tamlık ilişkisinin belirli bir kurala uymadığı saptanmıştır.

Tablo 4. Deney malzemesinin mekanik özellikleri.

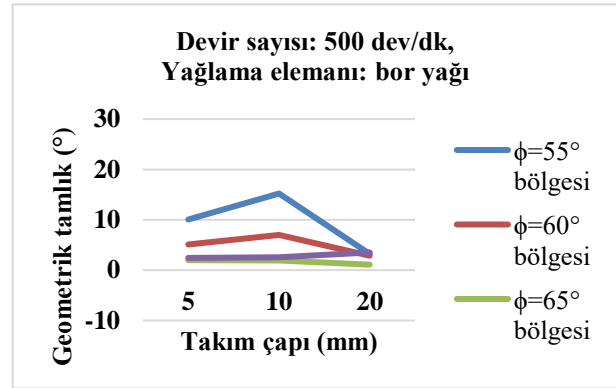
Mekanik Özellikler	
Ort. Mühendislik Gerilmesi	384,5774 MPa
Ort. Mühendislik Gerinimi	0,26 mm/mm
Ort. Akma Gerilmesi	$\sigma = 466,1745 \cdot \epsilon^{0,1745}$
Elastikiyet Modülü	141,7 GPa
Poisson Oranı	0,28



Şekil 8. $d = 10$ mm, yağlama elemanı=bor yağı şartı için geometrik tamlık-devir sayısı grafiği

Farklı yağlama elemanı kullanımının devir sayısı-geometrik tamlık ilişkisine etkilerini incelemek amacıyla takım çapı 10 mm sabit tutularak çalışmada kullanılan üç farklı devir sayısına ait geometrik tamlık-yağlama elemanı grafikleri oluşturulmuş ve bu grafikler Şekil 10, 11 ve 12’de verilmiştir. Şekil 10’daki grafik incelendiğinde en düşük devir sayısının kullanıldığı şartlarda Renol EP/AC’nin kullanıldığı şartlarda en iyi geometrik tamlık değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Şekil 11 ve 12’de verilen grafikler incelendiğinde ise

devir sayısı arttıkça Drawtex AC’nin kullanıldığı şartlarda daha iyi geometrik tamlık değerleri elde edildiği tespit edilmektedir. Yine Şekil 13’teki grafik incelendiğinde ise devir sayısının maksimum olduğu şartlarda ise Renol EP/AC ile Bor yağına kıyasla daha iyi geometrik tamlık değerlerine ulaşıldığı saptanmıştır. Takım çapının 10 mm olduğu şartlarda Drawtex AC ile elde edilen en iyi geometrik tamlık değeri yaklaşık 0,4°’dir ve devir sayısının 1000 rpm, duvar açısının 65° olduğu şartlarda elde edilmiştir. Renol EP/AC ile elde edilen en iyi geometrik tamlık değeri ise yaklaşık 0,56°’dir ve devir sayısının 250 rpm, duvar açısının 70° olduğu koşullarda elde edilmiştir. Bor yağı ile elde edilen en iyi geometrik tamlık değeri ise yaklaşık 1,35°’dir ve devir sayısının 250 rpm, duvar açısının 65° olduğu şartlarda elde edilmiştir.

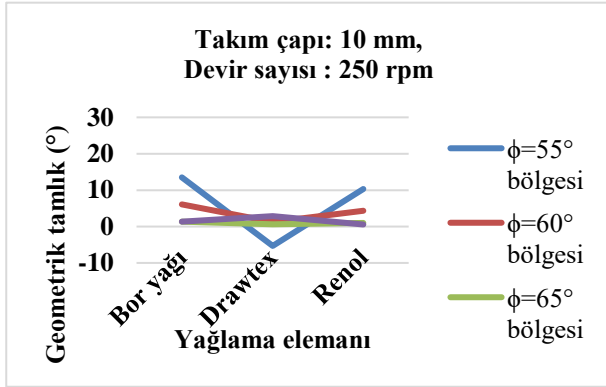


Şekil 9. $w = 500$ rpm, yağlama elemanı = bor yağı şartı için geometrik tamlık-takım çapı grafiği.

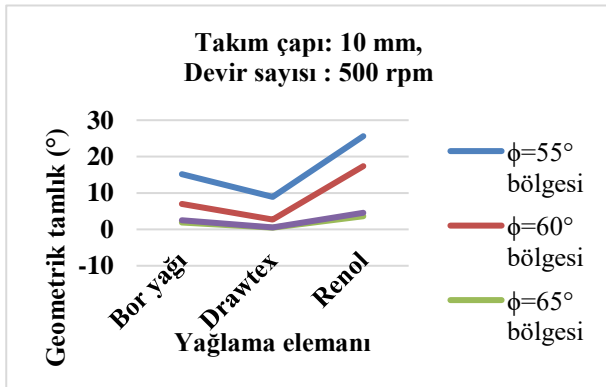
Takım çapının 5 mm olduğu koşullarda Renol EP/AC ile şekillendirme gerçekleştirilememiştir. Belirtilen koşullarda geometrik tamlık değerleri incelendiğinde Bor yağına Drawtex AC’ye göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Sonuçları gösteren grafik devir sayısının 500 rpm olduğu şartlar için oluşturularak Şekil 13’te verilmiştir.

Takım çapının 20 mm seçildiği şartlarda numunelere ait geometrik tamlık değerleri incelendiğinde Bor yağı ve Drawtex AC’nin Renol EP/AC’ye göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Takım çapı 20mm, devir sayısı

500 rpm şartları için geometrik tamlık-yağlama elemanı grafiği Şekil 14'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde küçük duvar açıları için Drawtex AC ile Bor yağına kıyasla daha iyi geometrik tamlık değerlerine ulaşılrken, açı arttıkça Drawtex AC ile elde edilen numunelerin duvar açıları ile hedef geometrinin duvar açısı arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Bor yağı ile gerçekleştirilen işlemlerde ise geometrik tamlık değerlerinin duvar açısından diğerleri kadar etkilenmediği belirlenmiştir.

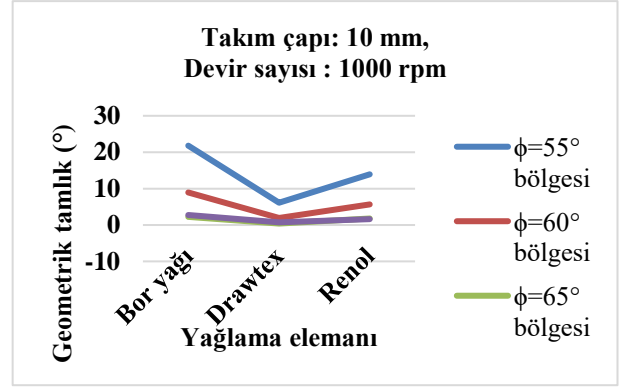


Şekil 10. $d = 10 \text{ mm}$, $w = 250 \text{ rpm}$ şartı için geometrik tamlık-yağlama elemanı grafiği.

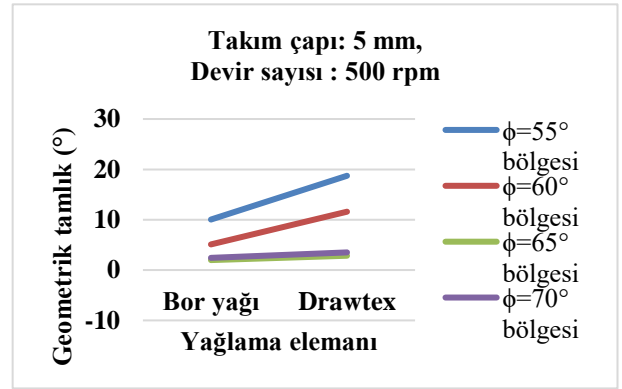


Şekil 11. $d = 10 \text{ mm}$, $w = 500 \text{ rpm}$ şartı için geometrik tamlık-yağlama elemanı grafiği.

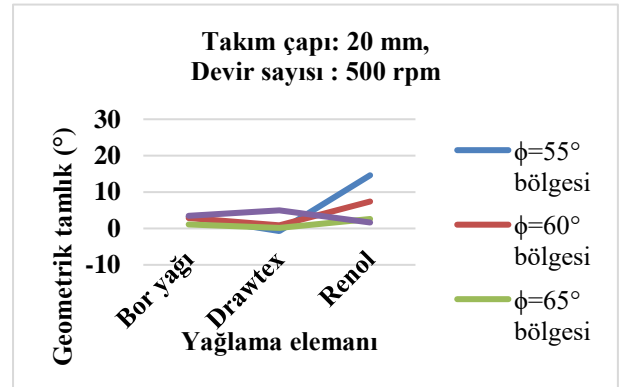
Literatürde bazı çalışmalarda AŞY ile şekillendirilmiş parçalarda gözlemlenen incelleme miktarının, geleneksel yöntemlerde belirtilen sinüs kuralına uyduğu ifade edilmektedir. Şekil 15'te verilen grafikte, Eş. 1'e göre, çalışmada belirlenen duvar açıları ile elde edilebilecek yaklaşık % incelleme miktarları verilmiştir.



Şekil 12. $d = 10 \text{ mm}$, $w = 1000 \text{ rpm}$ şartı için geometrik tamlık-yağlama elemanı grafiği.



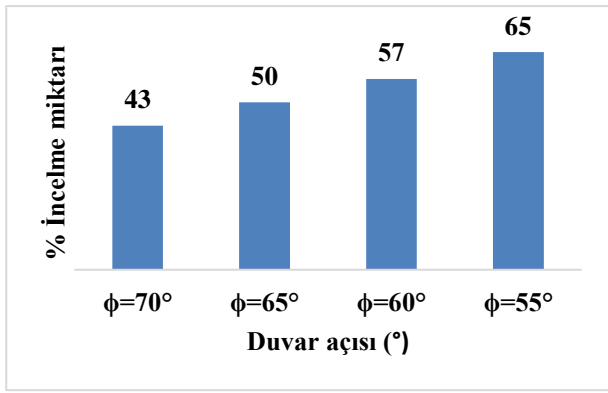
Şekil 13. $d = 5 \text{ mm}$, $w = 500 \text{ rpm}$ şartı için geometrik tamlık-yağlama elemanı grafiği.



Şekil 14. $d = 20 \text{ mm}$, $w = 500 \text{ rpm}$ şartı için geometrik tamlık-yağlama elemanı grafiği.

Takım çapının 10 mm, yağlama elemanının Bor yağı seçildiği şartlarda devir sayısının % incelleme miktarına etkisini incelemek için %incelleme miktarı-devir sayısı grafiği Şekil 16'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sac

malzemenin incelme miktarının, duvar açısının küçük olduğu şartlarda sinüs kuralının oldukça altında olduğu, $\phi=70^\circ$ olduğu şartlarda ise sinüs kuralının üzerine çıktığı görülmektedir. Ayrıca genel eğilim şekillendirilen duvar açısı arttıkça % incelme miktarının artması yönündedir. Ancak devir sayısı-% incelme miktarı ilişkisi incelendiğinde arada belirgin bir ilişki olduğundan bahsedilemez. Belirtilen koşullarda elde edilen maksimum incelme miktarı yaklaşık %58,59'dur ve en düşük devir sayısı ile en büyük duvar açısının şekillendirildiği şartlarda elde edilmiştir. Genel olarak $\phi=55^\circ$ bölgesinde incelme görülmemektedir.

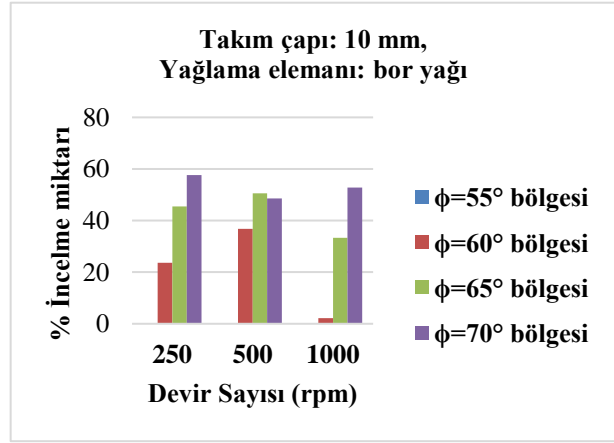


Şekil 15. Sinüs kuralına göre duvar açısı, % incelme miktarı ilişkisi.

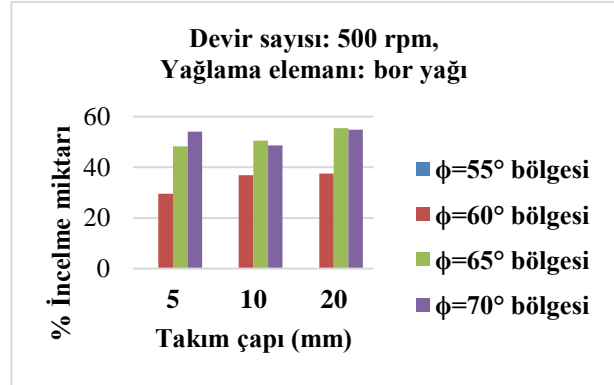
Devir sayısının 500 rpm, yağlama elemanının bor yağı seçildiği şartlarda takım çapının % incelme miktarına etkisi araştırılmış ve elde edilen grafik Şekil 17'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde genel eğilimin takım çapı arttıkça %incelme miktarının da arttığı yönündedir. Grafikte dikkat çeken diğer bir husus çap arttıkça duvar açısının % incelme miktarına etkisi azalırken, maksimum duvar açısına sahip bölgedeki % incelme miktarının takım çapından etkilenmediğidir.

Takım çapının 10 mm olduğu şartlarda devir sayısının %incelme miktarı-yağlama elemanı ilişkisine etkisinin incelenmesi amacıyla her bir devir sayısına ait grafik çizilerek Şekil 18, 19 ve 20'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde numunelerin her bölgesindeki % incelme miktarı esas alındığında en büyük % incelme miktarının devir sayısının 1000 rpm seçildiği ve Drawtex AC'nin kullanıldığı şartlarda elde edildiği

görülmektedir ve bu değer yaklaşık %63'tür. % incelme miktarı esas alındığında Drawtex AC'nin en iyi sonuç verdiği şartlar devir sayısının minimum olduğu şartlardır ve devir sayısı arttıkça bu yağlayıcı kullanılarak şekillendirilen numunelerdeki % incelme miktarı artmaktadır. Devir sayısının maksimum olduğu şartlarda Bor yağı % incelme miktarı bakımından en iyi sonucu vermektedir. Devir sayısının minimum olduğu şartlarda ise en iyi % incelme miktarını Renol EP/AC vermektedir.



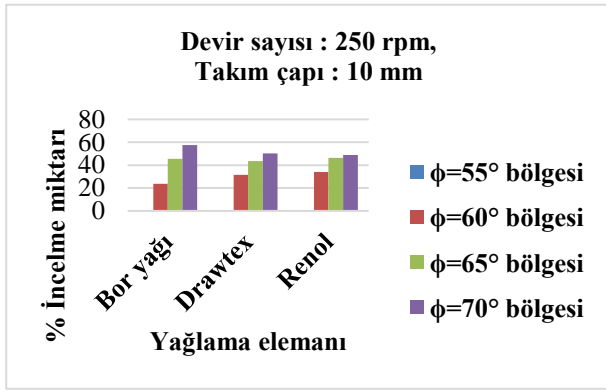
Şekil 16. $d = 10$ mm, yağlama elemanı = bor yağı şartı için % incelme miktarı-devir sayısı grafiği.



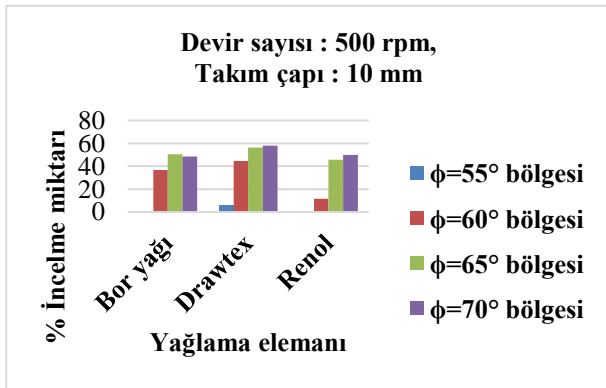
Şekil 17. $w = 500$ rpm, yağlama elemanı = bor yağı şartı için % incelme miktarı-takım çapı grafiği.

Diğer yandan devir sayısı 500 rpm, olarak sabit tutulduğu koşullarda takım çapı 5 mm ve 20 mm için yağlama elemanının % incelme miktarına etkisini incelemek amacıyla gerekli grafikler oluşturularak Şekil 21 ve 22'de verilmiştir. Şekil

19, 21 ve 22'deki grafikler birlikte incelendiğinde Renol EP/AC kullanılarak hedef geometrinin üretilemediği, bor yağı kullanılarak şekillendirilen numunelerde % incelme miktarının takım çapından etkilenmediği görülmektedir. Yine üç grafik birlikte incelendiğinde Drawtex AC ile elde edilen en iyi geometrik tamlık değerinin takım çapının 10 mm olduğu şartlarda, Renol EP/AC ile elde edilen en iyi geometrik tamlık değerinin ise takım çapının 20 mm olduğu şartlarda elde edildiği görülmektedir.



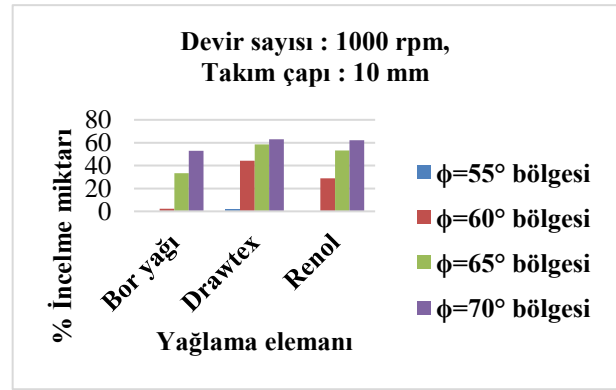
Şekil 18. $d = 10 \text{ mm}$, $w = 250 \text{ rpm}$ yağı şartı için % incelme miktarı-yağlama elemanı



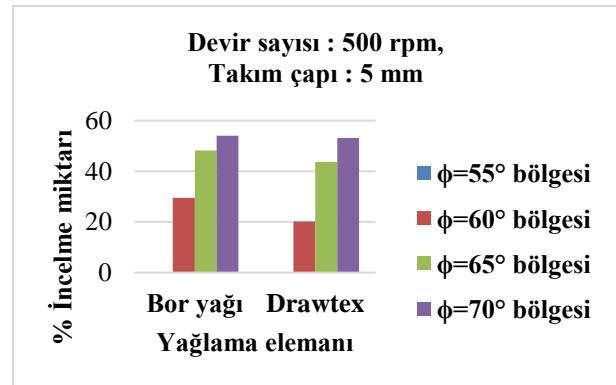
Şekil 19. $d = 10 \text{ mm}$, $w = 500 \text{ rpm}$ yağı şartı için % incelme miktarı-yağlama elemanı grafiği.

AŞY'nde gerekli işlem sıcaklığının şekillendirilebilirlik için en önemli etken olduğu bilinmektedir. Şekillendirme işlemi boyunca elde edilen işlem sıcaklığının az olması durumunda üretilen form hedef geometriye ulaşamayacaktır. Diğer taraftan işlem sıcaklığı

gereğin üzerinde olduğunda artan sıcaklık ile sac malzemenin şekillendirilebilirliği artacak ve hedef geometriden daha büyük duvar açısına ancak daha ince duvar kalınlığına sahip ürünler elde edilecektir. Bu nedenle her bir yağlama elemanının DC01 çelik sac malzemenin AŞY ile şekillendirilebilirliğine etkisi araştırıldığında her iki başarı ölçütünün birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca işlem sırasında takım-sac malzeme temas alanının bilinmesi de sonuçların doğru yorumlanabilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle Şekil 23'te deney parametrelerine göre Eş. 3 yardımıyla hesaplanan takım-sac malzeme temas miktarı grafiği verilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere takım çapı ve duvar açısı arttıkça takım-sac malzeme temas alanı artmaktadır.



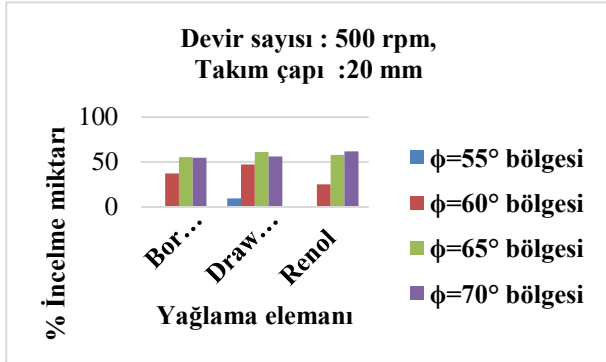
Şekil 20. $d = 10 \text{ mm}$, $w = 1000 \text{ rpm}$ yağı şartı için % incelme miktarı-yağlama elemanı grafiği.



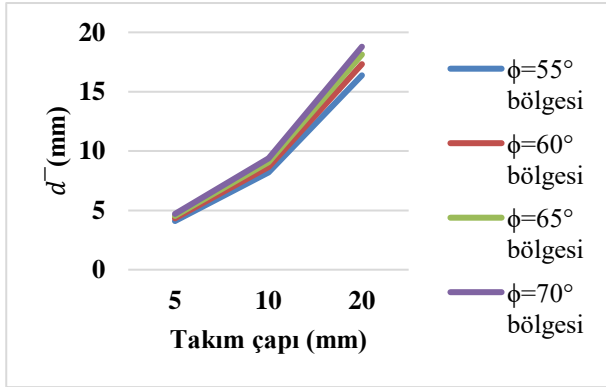
Şekil 21. $d = 5 \text{ mm}$, $w = 500 \text{ rpm}$ yağı şartı için % incelme miktarı-yağlama elemanı grafiği.

Genel sonuçlar incelendiğinde duvar açısının 55° olduğu bölge, şekil vermeye ilk başlanan bölge olduğundan bu bölgede artışlı şekillendirme ile

birlikte bükme de meydana gelmektedir. Bu nedenle bahsi geçen bölgede incelleme meydana gelmediği gibi geometrik tamlık bakımından en problemlili bölge de bu bölgedir.



Şekil 22. $d = 20 \text{ mm}$, $w = 500 \text{ rpm}$ yağ şartı için % incelleme miktarı-yağlama elemanı grafiği.



Şekil 23. Farklı duvar açıları için takım çapı temas yüzeyi grafiği.

Çalışmada her koşul için ilerleme miktarı 500 mm/min sabit seçildiği göz önüne alındığında takım, kendi etrafında bir tam turu tamamlayana kadar geçen sürede ilerleme miktarı / devir sayısı oranı kadar yol almaktadır ki bu oran bazı kaynaklarda hız faktörü olarak tanımlanmaktadır [14,15]. Hız faktörü azaldıkça işlem sırasında meydana gelen sürtünme ısısı artmaktadır. Hız faktörü sabit tutularak yağlama elemanları karşılaştırıldığında Drawtex AC ile optimum geometrik tamlık ve % incelleme miktarı değerleri, takım çapının 10 mm olduğu şartlarda elde edilmiştir. Takım çapı dolayısıyla takım-sac malzeme temas alanı arttıkça geometrik tamlık değerleri iyileşirken % incelleme miktarı artmaktadır. Hız faktörüne göre

sürtünme ısısı azaldıkça hem geometrik tamlık hem de % incelleme miktarı değerleri iyileşmektedir. Bu şartlar değerlendirildiğinde gerek temas alanı bakımından gerekse sürtünme ısısı bakımından işlem sıcaklığının düşük olduğu şartlarda Drawtex AC optimum özellikler vermektedir. Belirtilen yağlama elemanının su ile karıştırılmadan kullanıldığı düşünüldüğünde Drawtex AC'nin yağlama özelliğinin soğutma özelliğinden daha iyi olduğu görülmektedir. Aynı şartlarda Bor yağı değerlendirildiğinde, optimum değerlerin maksimum takım çapı ile elde edilmekte, takım çapı azaldıkça hedef geometri ile numunelerin duvar açıları arasındaki fark artarken, % incelleme miktarı azalmaktadır. Hız faktörüne göre hız faktörü arttıkça hem % incelleme miktarı artmış hem de hedef geometrinin duvar açısı ile numunelerin duvar açıları arasındaki fark artmıştır. Renol EP/AC ile yapılan çalışmalarda optimum değerler takım çapının maksimum olduğu şartlarda elde edilmektedir. Takım çapı azaldıkça % incelleme miktarı azalırken hedef geometri ile numunelerin duvar açıları arasındaki fark artmaktadır. Ayrıca hız faktörüne göre sürtünme ısısı arttığında geometrik tamlık iyileşirken % incelleme miktarı artmaktadır. Bahsi geçen yağlama elemanı ile gerek temas alanının gerekse hız faktörüne göre sürtünme ısısının maksimum olduğu şartlarda optimum değerlerin elde edilmesi, yağlama elemanının soğutma özelliğinin daha baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum çapı 5 mm olan takımın işlem sırasında kırılmasını da açıklamaktadır. Burada diğer bir dikkat çekici nokta Renol EP/AC ile Bor yağının benzer şartlarda optimum değerler vermesidir. Bunun nedeni her iki yağlama elemanının da su ile karıştırılarak kullanılmasıdır. Dolayısıyla her iki yağ da soğutma özelliği yüksek olan yağlama elemanlarıdır. Renol EP/AC ile elde edilen geometrik tamlık değeri yaklaşık $0,3^\circ$ iken Bor yağı için bu değer yaklaşık $0,55^\circ$ 'dir. İki yağlama elemanı % incelleme miktarı bakımından kıyaslandığında belirtilen şartlarda Renol EP/AC ile elde edilen değer yaklaşık %33,82 iken Bor yağı için bu değer yaklaşık %24,13'tür.

Çalışmada yağlama elemanı ile birlikte işlem ısısına etki eden takım çapı, devir sayısı, duvar

açısı gibi değişkenlerin DC01 malzemenin AŞY ile elde edilen numunelerin kalitesine etkileri incelenmiştir. Sonuçlara, hız faktörüne göre sürtünme ısısının ve takım-sac malzeme temas alanının etki ettiği gözlemlenmiştir. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Şekillendirmenin başladığı bölgede artışlı şekillendirilmeden daha çok bükme meydana gelmiş ve bahsi geçen bölgede incelleme görülmemiş ve istenilen duvar açıları elde edilememiştir Renol EP/AC kullanıldığı şartlarda takım kırıldığı için çapı 5 mm olan takım ile hedef geometriye ulaşılamamıştır. Diğer şartlarda hasarsız numuneler elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonunda, bor yağının soğutma özelliğinin, su ile karıştırılmayan çekme sıvama yağının ise yağlama özelliğinin daha baskın olduğu, su ile karıştırılan çekme sıvama yağının hem yağlama hem soğutma özelliğine sahip olduğu ancak soğutma özelliğinin su ile karıştırılmayan çekme sıvama yağına göre daha üstün, bor yağına göre daha zayıf, yağlama özelliğinin ise bor yağına göre daha üstün, su ile karıştırılmayan çekme sıvama yağına göre daha zayıf olduğu belirlenmiştir.

Takım çapı ve duvar açısı arttıkça takım-sac malzeme temas alanı artmaktadır. Ayrıca takım, kendi etrafında bir tam turu tamamlayana kadar geçen sürede ilerleme miktarı / devir sayısı oranı kadar yol almaktadır ve bu oran literatürde hız faktörü olarak tanımlanmaktadır. Hız faktörü azaldıkça diğer bir deyişle devir sayısı arttıkça işlem sırasında meydana gelen sürtünme ısısı artmaktadır.

Hız faktörüne göre sürtünme ısısı azaldıkça hem geometrik tamlık hem de % incelleme miktarı değerleri iyileşmektedir. Bu şartlar değerlendirildiğinde gerek temas alanı bakımından gerekse sürtünme ısısı bakımından işlem sıcaklığının düşük olduğu şartlarda Drawtex AC optimum özellikler vermektedir. Soğutma özelliği yağlama özelliğine göre daha yüksek olan su ile karıştırılan yağlama

elemanları ile yapılan çalışmalarda takım çapı arttıkça optimum sonuçlar elde edilmiş, takım çapı azaldıkça % incelleme miktarı azalsa da hedef geometriye istenilen tamlıkla ulaşılamamıştır.

Teşekkür

Bu çalışmayı, 2013-121 nolu proje ile destekleyen Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Van Sy L., (2009) Modelling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet”, Doctoral Thesis, Padua University, Padova.
- Hussain G., Gao L., Dar N. U., (2007) An Experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 54-53.
- Martins, P. A. F., Bay, N., Skjødt, M., & Silva, M. B., (2008) Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57(1), 247-252.
- Ambraglio G., Cozza V., Filice L., Micari F., (2007) An Analytical Model for Improving Precision in Single Point Incremental Forming , *Journal of Materials Processing Technology*, 191, 92-95.
- Hirt G., Ames J., Bambach M., Kopp R., (2004) Forming Strategies of Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 53(1), 203-206.
- Allwood J. M., Braun D., Music O., (2010) The Effect of Partially cut-out Blanks on Geometric Accuracy in Incremental Sheet Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1501-1510.
- Liu W., Liu Q., Ruan F., Liang Z., Qui H., (2007) Springback Prediction for Sheet Metal Forming Based on GA_ANN Technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 227-231.
- Tekaslan Ö., Gerger N., Şeker U., (2008) V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme Miktarının Tespiti, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 23(1), 231-238.
- Panthi S. K., Ramakrishnan N., Ahmed M., Singh S. S., Goel M. D., (2010) Finite Element

- Analysis of Sheet Metal Bending Process to Predict the Springback, *Material and Design*, 31, 657-662.
- De Souza T., Rolfe B. F.,(2010) Characterising Material and Process Variation Effects on Springback Robustness for a Semi-Cylindrical Sheet Metal Forming Process, *International Journal of Mechanical Sciences* 52, 1756-1766.
- Karaağaç İ., Özdemir A., (2011) Erdemir 6112 sac malzemenin hidromekanik derin çekme yöntemiyle şekillendirilebilirliği, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 26-4, 841-850.
- Köhler B., Bomas H., Hunkel M., Lütjens J., Zoch H. W., (2010) Yield strength behaviour of carbon steel microsheets after cold forming and after annealing, *Scripta Materialia*, 62, 548-51.
- Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., & Allwood, J., (2005) Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(2), 88-114.
- Hamilton K., Jeswiet J., (2010) Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 311-314.
- Ambrogio G., Filice L., Gagliardi F., (2012) Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming, *Materials & Design*, 34, 501-508.

Investigation of the influence of lubrication state on formability of DC01 steel alloy sheet metal by ISF

Extended abstract

The aim of present study focuses on investigating the performance of lubricants used during Incremental Sheet Metal Forming (ISF) process of DC01 steel sheet alloys. It is known that the source of process temperature is friction in ISF operations and tool-sheet metal contact area and spindle speed when the area is constant during the operation control friction temperature. In an attempt to explain effects of lubricants on the quality formed by ISF method, also influence of the mentioned two parameters on product quality were investigated.

In this study, the truncated conical with four different wall angle was formed by ISF. Tool diameter, spindle speed, lubrication type were set as variables of experiments. Thinning % and geometrical accuracy were defined as performance criteria.

The CAD data of formed parts were obtained by 3D laser scanning and used to measure wall angle and thickness. The difference between wall angles of target geometry and formed parts was defined as geometrical accuracy and difference between the initial and final thicknesses of sheet metal is specified as thinning %.

In the present study, three different lubricants (boron oil and water-soluble drawing and spinning oil-Renol EP/AC and water-insoluble drawing and spinning oil- Drawtex AC), tool diameter ($\varnothing 5$ mm, $\varnothing 10$ mm and $\varnothing 20$ mm) and spindle speeds (250 rpm, 500 rpm, 1000 rpm) were used.

Defect-free samples could be formed using all parameters except the conditions used the smallest tool diameter and water-soluble drawing, and spinning oil.

The main findings of this study are as follows. In the first zone where forming begins, bending occurred instead of incremental sheet metal forming and also thinning do not observed in the mentioned zone.

It is confirmed that, the boron oil has the best cooling effect when the water-insoluble drawing and spinning oil has the best lubrication effect.

It is clear that, tool/sheet metal contact area increased with increasing tool diameter and forming wall angle. On the other hand, the ratio of feed-rate in other words forming speed to spindle speed is defined as speed factor in the literature. The experimental results showed that, friction temperature generated during incremental sheet metal forming process increased with the decreasing speed factor. Also, better geometric accuracy and thinning values was obtained with decreasing speed factor.

On the other hand, water-insoluble drawing and spinning oil has the best lubrication properties gave the better result in the conditions used low process temperatures and small tool/sheet metal contact area. The optimum result was determined with water-soluble drawing and spinning oil when the tool diameter increased. Moreover, it is observed that, the thinning % was reduced with decreasing tool diameter. Also, geometric accuracy was decreased when the mentioned lubricant was used.

Keywords ISF, lubrication, speed factor, thinning, geometric accuracy.