

Hakan Kalkan
M.Sc.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Tuğçe Hacaloğlu
M.Sc.

ATILIM Üniversitesi
Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu
Prof. Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü ve
Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
Ankara

Sac Şekillendirme İşleminde Sürtünmenin İncelenmesi

Derin çekme işleminde sürtünme, baskı plakası-sac metal-kalıp yüzeyleri arasında "radyal çekme bölgesinde" ve zimba-sac metal arasında "gerdirme bölgesinde" bölgelerinde gerçekleşmektedir. Bu bölgelerde oluşan sürtünme katsayısı, zimba kuvveti değerleri ve optik tarayıcıdan elde edilen genleme dağılımları kullanılarak iki yöntemle hesaplanmıştır. Bu hesaplama yöntemleri hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Konunun incelenmesi, elde edilecek sonuçların sürecin teorik modellenmesinde kullanımı ve kullanılan yağlayıcı maddelerin değerlendirilmesi açılarından da oldukça önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme, Derin Çekme, Triboloji

1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme işlemlerinde sürtünme, şekillendirme esnasında malzeme akışını ve ürün kalitesini etkileyen önemli süreç parametrelerindedir. Sürtünmenin büyüklüğünü bilmek bir çok nedenden dolayı önemlidir. İşlem esnasında gerekli olacak kuvvet ve enerji gereksinimleri, takımlardaki aşınmalar gibi önemli konular ancak sürtünmenin bilinmesiyle tahmin edilebilir.

Şekillendirme süreçlerinin optimizasyonunda ve geliştirilmesinde sonlu elamanlar yöntemi temelli nümerik simülasyonların kullanımı gün geçtikçe gelişerek artmaktadır. Böylece sanal imalatla zaman, maliyet gibi parametreler azaltılarak önemli fayda sağlanmaktadır.

Sac metal şekillendirme simülasyonlarının sonuçlarının verimliliği birkaç parametrenin doğru modellenmesi ile ilgilidir. Bunlardan en önemli olanları malzeme karakterizasyonu, malzeme akma kuralları, kontak koşullarının tanımlanması ve sürtünme koşullarının modellenmesidir. Bu çalışma ile sac metallerin şekillendirilmesinde oluşan sürtünme gerçeğe olana en yakın olarak bulunması amaçlanmaktadır. Deformasyon esnasında oluşan sürtünmeyi modellemek oldukça zor bir konudur ve bu nedenle şimdiye kadar yapılan çalışmalar gerçek

süreç koşullarında yapılamadığından ve varsayımlara dayandığından alınan sonuçlar yetersiz kalmıştır.

Bu çalışmanın amacı, sac metal şekillendirme işlemlerinde verimliliği arttırmak için genleme dağılımı ve zimba kuvveti gibi deneysel verilerin kullanıldığı yeni bir sürtünme katsayısı hesaplama yöntemi geliştirmektir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, yüzey karakterizasyonunun belirlenmesinde yardımcı olabilir. Geliştirilen yöntem ile yağlayıcıların ve sıcaklığın etkisi de araştırılabilir.

Sac metal şekillendirme işlemlerinde sürtünmeyi inceleyen ve bu çalışmanın temeli olan daha önceki bir çalışmada, sürtünme katsayısı hesaplamaları doğrusal olmayan ekstrapolasyon ve manuel genleme ölçümleri ile hesaplanmıştır. Sadece oda sıcaklığında yapılan bu testlerde elde edilen sonuçların hata oranı ölçümlerin hassasiyeti nedeniyle daha yüksekti [1].

Geçmiş yıllardaki çalışmalarda "şerit çekme testi (strip draw test)" gibi testler yağlayıcı etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Bu çalışmalarda su bazlı yağlayıcılar, petrol bazlı yağlayıcılardan daha iyi etki göstermiş ve diğer koşullar değişmeden baskı plakası kuvvetinin artmasına karşın sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür, [2].

Bir diğer çalışmada sürtünme katsayısı değerleri yüksek sıcaklıkta ve yağlayıcı ortamda hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda yağlayıcı

kullanımının şekillendirme kuvvetinin ve kalıp aşınmasının azalmasını sağladığı görülmüştür, [3]. “şerit çekme testi ” den elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sac metal şekillendirme işlemlerinde yağlayıcının önemini göstermek içinde kullanılmıştır, [4].

Yüzey koşulları da sürtünme katsayısını etkileyen unsurlardandır. Bu etkiyi inceleyen bir çalışmada, sac metalin şekillendirme esnasında oluşan deformasyona bağlı olarak yüzey parametreleri 3 boyutlu ölçümler ile elde edilmiştir, [5]. Diğer bir çalışmada kalıpların yüzey topografyası ve sürtünme arasındaki ilişki incelenerek sürtünme ile yüzey karakterizasyonu parametreleri elde edilmiştir.

Bu testlerden elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yönetimi temelli simülasyonlar da kullanılmıştır. Bu simülasyonların elde edilmesinde sürtünmenin önemi ve simülasyonların sac metal şekillendirme sanayi için önemi vurgulanmıştır, [7].

2. TEORİ

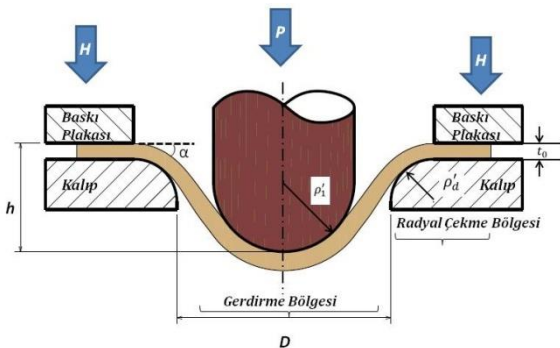
2.1 Radyal çekme bölgesinde:

Derin çekme işleminde, baskı plakası-sac metal-kalıp yüzeyleri arasında " radyal çekme bölgesi" olarak bilinen bölge Şekil-1 de görülebilir. Bu bölgede oluşan sürtünme dikey ve yatay denge denklemlerinden elde edilmiş aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir, [1].

$$\mu = \frac{\delta P \cot \alpha}{2\delta H + \delta P} \quad (1)$$

Burada sac metalin zımbaya sarım açısı “ α ” ile çekme derinliği “ h ” arasında aşağıdaki gibi bir denklem eşitliği vardır.

$$h = \left(\frac{D}{2} + \rho'_d\right) \tan \alpha - (\rho'_1 + \rho'_d + t_0)(\sec \alpha - 1) \quad (2)$$



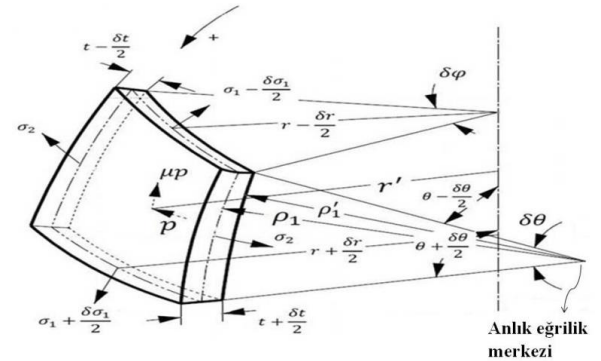
Şekil 1. Derin çekme işlemi.

Diğer koşullar aynı kalmak kaydıyla sadece baskı plakası kuvvetinin değiştirilmesiyle yapılacak derin çekme testleriyle değişen zımba kuvveti

değerleri kullanılarak eşitlik (1) yardımıyla sürtünme katsayısı değerleri hesaplanabilir. Bu yöntem hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda elde edilen veriler için kullanılabilir.

2.2 Gerdirme Bölgesinde:

Zımba ve sac metal arasında kalan gerdirme bölgesinde sürtünme denge ve plastisite denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Şekil-2 derin çekme işleminde eleman üzerinde oluşan gerilmeler görülebilir.



Şekil 2. Eleman üzerindeki gerilmeler.

h : çekme derinliği

k : gerilme oranı (stress ratio) = $\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$

x : gerilme oranı (stress ratio) = $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

R : çekme yönündeki anizotropi parametresi

r : şekillenmiş sac metal duvarının anlık yarıçapı

r_0 : şekillenmiş sac metalin orijinal yarı çapı

t : şekillendirme esnasındaki kalınlık

t_0 : orijinal kalınlık

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: meridyenel, çevresel ve kalınlık yönlerinde gerçek plastik genleme (true plastic strain) değerleri

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: meridyenel, çevresel ve kalınlık gerilmeleri (stresses)

θ : sac metal üzerindeki elemanın normalinin dikey eksen ile yapmış olduğu açı

μ : sürtünme katsayısı

ρ : sac metal üzerindeki elemanın eğrilik yarıçapı

Radyal yöndeki denge denklemi:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\sigma_1 t r) + \left[p \rho_1' \frac{r'}{r} (\tan \theta - \mu) - \sigma_1 t \tan \theta - \sigma_2 \frac{\rho_1 t}{r \cos \theta} \right] \frac{d\theta}{dr} \quad (3)$$

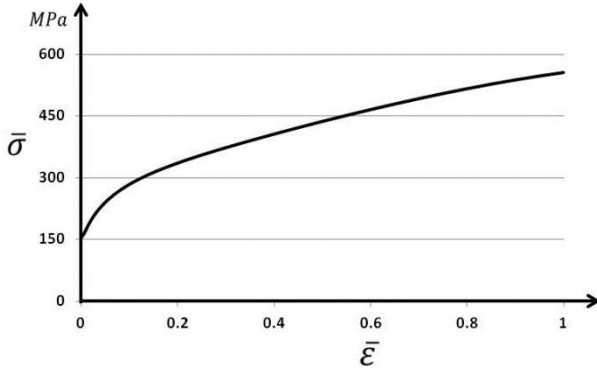
Dikey yöndeki denge denklemi:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\sigma_1 t r) + \left[\sigma_1 t \cot \theta - p \rho_1' \frac{r'}{r} (\cot \theta + \mu) \right] \frac{d\theta}{dr} = 0 \quad (4)$$

Eşitlik (4), eşitlik (3)'den çıkarılır ise;

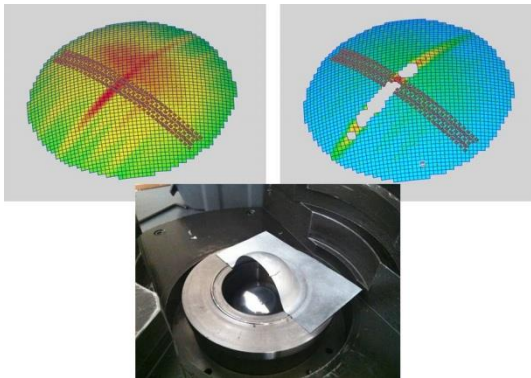
$$p = \frac{t}{\rho r} (\sigma_1 r + \sigma_2 \rho_1 \sin \theta) \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten açıkça görüleceği üzere ara yüzeyde oluşan basınç p , θ açısı ile değişmektedir. Ara yüzey basıncının hesaplanması için θ açısının yanında σ_1 ve σ_2 gerilme değerlerinin de bilinmesi gerekir. Bu iki gerilmenin deformasyon esnasında ölçülmesi mümkün olmadığı için malzeme genleme dağılımları ve malzeme akma eğrisi kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir.



Şekil 3. EN 10346/ DX54D+Z çelik malzeme için akma eğrisi (eşdeğer gerilme-eşdeğer genleme).

Zimba ve sac metalin temasıyla oluşan deformasyondaki genleme dağılımlarına ait farklı aşamalarda 3 boyutlu optik tarayıcı görüntüleri Şekil-4 de görülebilir.



Şekil 4. Optik tarayıcı ölçümlerine ait görüntüler.

Ara yüzey basıncının hesaplanması için ihtiyaç duyulan σ_1 ve σ_2 gerilmeleri yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Eşdeğer genleme denklemi;

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (6)$$

denklemler ile elde edilen değerlere karşılık gelen Eşdeğer gerilme değerleri Şekil-3 'de gösterilen malzeme akma eğrisi yardımıyla bulunabilir. Burada ;

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \cong 0 \quad (7)$$

kabulu ile eşdeğer gerilme denklemi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2\}} \quad (8)$$

σ_1 ve σ_2 gerilme değerleri arasındaki ilişki genleme dağılımları ile elde edilebilir.

$$\frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_2} = \frac{\frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right]}{\frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right]} = r_\epsilon \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2r_\epsilon + 1}{2 + r_\epsilon} \quad (10)$$

Sac metal üzerindeki gerilmeler arasında elde edilen ilişki yardımıyla ara yüzey basıncı aşağıdaki denklem yardımıyla yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$p = \sigma_1 t \left[\frac{1}{\rho} + \frac{x \sin \theta}{r} \right] \quad (11)$$

Eşitlik (3) ve (4)'ün dikey ve radyal yönde denge denklemleri olduğunu hatırlarsak. Yarı küresel zimba ve ince saclar için;

$$r = \rho_1 \sin \theta \quad \text{and} \quad dr = \rho_1 \cos \theta d\theta \quad (12)$$

$$r \sim r' \quad \text{and} \quad \rho_1 = \rho_1' \quad (13)$$

olarak kabul edilebilir.

Eşitlik (12) ve (13) eşitlik (4) içinde kullanılır ise;

$$\frac{d(\sigma_1)}{d\theta} + 2(\sigma_1 t) \cot \theta = p \rho (Cot \theta + \mu) \quad (14)$$

elde edilir. Burada eşitlik (14) birinci dereceden lineer diferansiyel denklemdir. Bu denklemin çözümü her terimin $e^{\int 2 \cot \theta d\theta}$ ile çarpılması ile mümkündür.

$$(\sigma_1 t)'(\sin \theta)^2 + 2(\sigma_1 t) \cot \theta (\sin \theta)^2 = p\rho (\cot \theta + \mu)(\sin \theta)^2 \quad (15)$$

$$(\sigma_1 t)'(\sin \theta)^2 + 2(\sigma_1 t) \frac{\cos \theta}{\sin \theta} (\sin \theta)^2 = p\rho \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta} + \mu \right) (\sin \theta)^2 \quad (16)$$

$$(\sigma_1 t)'(\sin \theta)^2 + 2(\sigma_1 t) \sin \theta \cos \theta = p\rho \sin \theta \cos \theta + p\rho \mu (\sin \theta)^2 \quad (17)$$

$$(\sigma_1 t)'(\sin \theta)^2 + (\sigma_1 t) \sin 2\theta = p\rho \sin \theta \cos \theta + p\rho \mu (\sin \theta)^2 \quad (18)$$

$$v'u + u'v = (uv)'$$

$$(uv)' = p\rho \sin \theta \cos \theta + p\rho \mu (\sin \theta)^2$$

burada $u = (\sin \theta)^2$, $v = (\sigma_1 t)$

$$(\sigma_1 t(\sin \theta)^2)' = p\rho \sin \theta \cos \theta + p\rho \mu (\sin \theta)^2 \quad (19)$$

$$\sigma_1 t(\sin \theta)^2 = \int p\rho \sin \theta \cos \theta d\theta + \int p\rho \mu (\sin \theta)^2 d\theta \quad (20)$$

$$\sigma_1 t(\sin \theta)^2 = \rho \int p \sin \theta \cos \theta d\theta + \rho \mu \int p (\sin \theta)^2 d\theta \quad (21)$$

$$p = a\theta^2 + b\theta + c \quad (22)$$

$$\int p \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{1}{8} [(-4c(\cos \theta)^2) + (a - 2b\theta - 2a\theta^2) \cos(2\theta) + (b + 2a\theta) \sin(2\theta)] \quad (23)$$

$$\int p (\sin \theta)^2 d\theta = \frac{2\theta(6c + 3b\theta + 2a\theta^2) - 3(b + 2a\theta) \cos(2\theta) - 3(-a + 2c + 2b\theta + 2a\theta^2) \sin(2\theta)}{24} \quad (24)$$

$$\sigma_1 t(\sin \theta)^2 = \rho A + \rho \mu B \quad (25)$$

$$\sigma_1 t(\sin \theta)^2 = \rho(A + \mu B) \quad (26)$$

$$\sigma_1 = \frac{\rho}{t(\sin \theta)^2} (A + \mu B) \quad (27)$$

$$\sigma_2 = \frac{p\rho}{t} - \sigma_1 \quad (28)$$

$$\sigma_2 = \frac{p\rho}{t} - \frac{\rho}{t(\sin \theta)^2} (A + \mu B) \quad (29)$$

$$\sigma_2 = \frac{\rho}{t} \left[p - \frac{1}{(\sin \theta)^2} (A + \mu B) \right] \quad (30)$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{p - \frac{1}{(\sin \theta)^2} (A + \mu B)}{\frac{1}{(\sin \theta)^2} (A + \mu B)} = x \quad (31)$$

Sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\mu = \frac{p - \frac{A}{(\sin \theta)^2} (x + 1)}{\frac{B}{(\sin \theta)^2} (x + 1)} \quad (32)$$

$$A = \frac{1}{8} [(-4c(\cos \theta)^2) + (a - 2b\theta - 2a\theta^2) \cos(2\theta) + (b + 2a\theta) \sin(2\theta)]$$

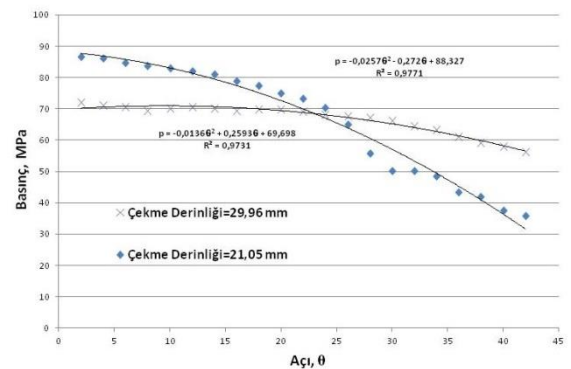
$$B = \frac{1}{24} [2\theta(6c + 3b\theta + 2a\theta^2) - 3(b + 2a\theta) \cos(2\theta) - 3(-a + 2c + 2b\theta + 2a\theta^2) \sin(2\theta)]$$

3. DENEYLER

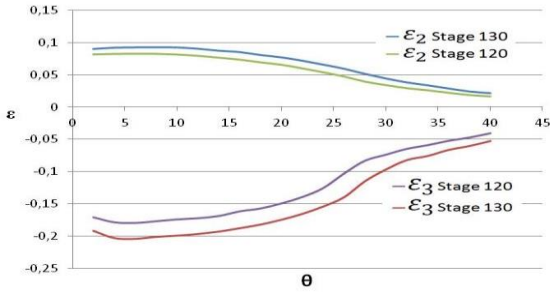
3.1 Gerdirme Bölgesinde:

Zımba-sac metal temasında oluşan sürtünmenin hesaplanmasında kuru ve parafin yağlayıcılar kullanılarak 9 farklı test yapılmıştır. Testlerde 1,2 mm kalınlığında 250 mm genişliğinde kare sac parçalar kullanılmıştır.

Şekil-5 de görüleceği üzere ara yüzey basınç değerleri eşitlik (11) kullanılarak hesaplanabilir. İki farklı aşamada elde edilmiş genleme dağılımları ise Şekil-6 da görülmektedir. Ara yüzey basıncı θ ya bağlı olarak ikinci dereceden bir eğri ile ifade edilirse. Bu denklemin eşitlik (32) de kullanılması ile sürtünme katsayısı değerleri elde edilebilir.

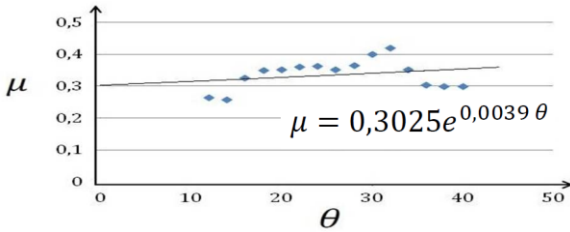


Şekil 5. EN 10346/ HX220BD+Z malzeme için ara yüzey basınç dağılımları.



Şekil 6. EN 10346/ HX220BD+Z çelik malzeme için genleme dağılımları.

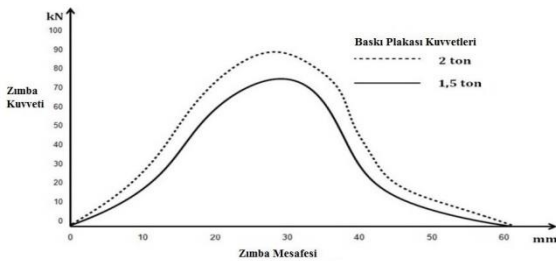
3 boyutlu optik tarayıcıdan elde edilen Şekil-6 daki genleme dağılımlarıyla hesaplanan gerilme oranı ve elde edilen basınç değerleri kullanılarak hesaplanmış sürtünme katsayısı değerlerine Şekil-7 örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 7. Eşitlik (32) kullanılarak hesaplanmış EN 10346/ HX220BD+Z çelik malzemeye ait sürtünme katsayısı değerleri.

3.2 Radyal çekme bölgesinde:

Derin çekme testleri, 1,5 mm kalınlığında EN 10268 çelik malzeme ile kuru ve grafit yağlayıcı ortamlarda 42 mm çapında yarı küresel zımba ile gerçekleştirilmiştir. Testler hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda yapılmıştır.



Şekil 8. EN 10268 çelik malzemeye ait farklı baskı kuvvetlerinde zımba kuvveti değerleri.

Diğer parametreler aynı kalmak kaydıyla sadece baskı plakası kuvvetinin değiştirilmesiyle farklı zımba kuvveti değerleri Şekil-8 görüleceği üzere elde edilebilir.

Şekil-9 da derin çekme presi, yük hücresi ve veri toplama cihazı görülmektedir. Baskı plakası kuvveti ve zımba kuvveti eşitlik (1) de kullanılarak

sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo-2 de görülebilir.



Şekil 9. Derin çekme işleminde kullanılan mekanik pres ve test düzeneği.

4. DENEY BULGULARI

4.1 " Gerdirme Bölgesinde " ve " Radyal çekme " bölgesinden elde edilen sonuçlar:

9 farklı test sonucundan elde edilmiş sonuçlar Tablo-1 de görülebilir. Sürtünme katsayısı değerleri farklı aşamada elde edilmiş genleme dağılımlarından hesaplanmıştır. Tablo-1 deki çekme derinliği değerleri iki farklı aşamayı göstermektedir.

Tablo 1. Gerdirme bölgesi için elde edilen sürtünme katsayısı değerleri

Test	Malzeme	Yağlayıcı	Çekme Derinliği (mm)
1	EN 10346/ DX54D+Z	Kuru	21,50-19,08
2	EN 10346/ DX54D+Z	Kuru	29,96-25,13
3	EN 10346/ HX380LAD+Z	Kuru	17,11-14,73
4	EN 10346/ HX380LAD+Z	Kuru	21,85-19,47
5	EN 10346/ HX220BD+Z	Kuru	20,64-18,25
6	EN 10346/ HX220BD+Z	Kuru	25,44-23,03
7	EN 10346/ DX54D+Z		23,76-22,59
8	EN 10346/ HX380LAD+Z		14,62-12,81
9	EN 10346/ HX380LAD+Z		17,94-16,34

Radyal çekme bölgesinde yüzey pürüzlülüğü Alicona® sistemi kullanılarak kalıp için $R_a = 0,20 \mu\text{m}$, sac metal için $R_a = 1,82 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

Testlerde kullanılan çelik malzemelere ait kimyasal bileşenler Tablo-3 de görülebilir.

Tablo 2. Radyal çekme bölgesi için elde edilen sürtünme katsayısı değerleri

Malzeme	Yağlayıcı	Açı	Baskı Kuvveti (N)
EN 10268	Kuru	15	22350-14900
		30	
		35	
		40	
EN 10268	Kuru	15	29800-22350
		30	
		35	
		40	
EN 10268	Grafit	15	22350-14900
		30	
		35	
		40	
EN 10268	Grafit	15	29800-22350
		30	
		35	
		40	

4.2 Diğer kaynaklardan elde edilmiş sonuçlar:

Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta elde edilmiş sonuçlar daha önceki çalışmalardan elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılabilir.

5. SONUÇLAR

Derin çekme işleminde sürtünme katsayısı değerleri zımba-sac metal ve kalıp-baskı plakası-sac metal arasında iki bölge için incelenmiştir. Tablo-4 de "şerit çekme testi" ve "çekme altında eğme(bending under tension)" gibi test koşullarında elde edilmiş sonuçlar görülmektedir. Ancak bu çalışma da gerçek bir derin çekme işlemi için sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 3. Testlerde kullanılan çelik malzemelere ait kimyasal kompozisyon.

Eşdeğer Standart			C	Si	Mn	P	S	Al	V	Nb	Ti
Standart	Benzer Standart	Erdemir	max.	max.	max	max	max	max	max	max	max
EN 10268	-	7140	0.14	0.50	1.60	0.030	0.025	0.015	-	0.090	0.15
EN 10346/ HX220BD+Z	52814/9.52873	380 ⁽¹⁾⁽²⁾	0.007- 0.06	0.50	0.15- 0.70	0.05- 0.09	0.03	0.02- 0.07	-	-	-
EN 10346/ HX380LAD+Z	52811/9.52873	368 ⁽³⁾	0.12	0.50	1.50	0.030	0.030	0.015 (min)	0.10	0.10	
EN 10346/ DX54D+Z	52806/9.52873	326	0.008	0.03	0.30	0.025	0.020	0.02 (min)		0.035	0.11

1) % Ni+%Cu+%Cr+%Mo≤0.5, 2) % C+% P≤0.16 3) % Nb+Ti+V≤0.22

Tablo 4. Daha önceki çalışmalardan elde edilmiş sonuçlar .

Test türü	Yağlayıcı	Malzeme	Sürtünme Katsayısı	Kaynak
Strip Drawing	Mineral yağlayıcı	AI99.5	0,15-0,32	[8]
Bending Tension	Yağ	DP 600	0,14-0,16	[5]
Strip drawing	Mineral yağlayıcı	A1100	0,2-0,23	[9]
Draw bead	Baskı yağlayıcısı	DP 600	0,12-0,16	[10]
Strip tension	Kuru	AA 1050	0,29	[11]
Draw bead	Yağ	AKDQ steel	0,08-0,17	[12]
Flat drawing	Kuru	SPHC	0,45 (600°C) 0,44 (700°C) 0,48 (800°C)	[13]
Hot stamping	Su bazlı yağlayıcı	SPHC	0,12 (600°C) 0,14 (700°C) 0,13 (800°C)	[13]

Tablo-1 de görüleceği üzere "gerdirme bölgesi" testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri çekme derinliği arttıkça az da olsa bir artış göstermiştir. Parafinin yağlayıcı olarak kullanılması sürtünme katsayısının düşmesinde önemli rol oynamıştır. Genleme dağılımı değerleri yüksek sıcaklıklarda da elde edilir ise bu yöntem yüksek sıcaklıklarda da sürtünme katsayısının hesaplanmasında kullanılabilir.

Radyal çekme bölgesinde oda sıcaklığında yapılan testlerde, kuru ve grafit yağlayıcı durumlarda sürtünme katsayısı deformasyonun artışıyla az düşüş göstermiştir. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü oluşturan çıkıntılarla deformasyonla düzleşmesiyle açıklanabilir. Benzer bir durum daha az belirgin olmakla birlikte 300° de gözlemlenmiştir. Yağlayıcı, kuru durumda 300° de yapılan testlerde elde edilen sonuçların, oda sıcaklığına göre sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü görülmüştür. Grafit yağlayıcı hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürmüştür.

İnceleme yapılan her iki bölge için hesaplanan sürtünme katsayısı değerleri benzer aralıktadır. Kuru ve yağlayıcı ortamlarda elde edilen sonuçlar daha önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir seviyededir. Literatürde karşılaştırılan sonuçların aynı aralıklarda değişimler göstermesi, bu testlerin farklı simülasyon testleri olması sebebiyledir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FRICTION IN DEEP DRAWING

Investigation of friction is carried out in the radial drawing region between the die and blank holder and also in the stretching zone over the punch in deep drawing. Two methods are developed to calculate the coefficient of friction in each zone using the experimentally determined data such as punch force diagrams and strain distributions obtained by an optical scanning system. The current methods differ from the existing techniques which are obtained in simulative tests. The proposed methods can be applied in room temperature and at elevated temperatures. Comparisons of friction coefficients are made with those obtained by other techniques.

Keywords: Friction , Deep drawing, Tribology

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Atılım Üniversitesi tarafından ATU-BAP-A-1213-06 proje numarası ile Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Bu çalışmadaki katkılarından ötürü Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi ve BOREN Bor Kaplamalar Yetkinlik Merkezi'ne teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKÇA

1. Kaftanoğlu B., 1973, Determination of coefficient of friction under conditions of deep-drawing and stretch forming, *Wear*, 25/2:177-188.
2. Subramonian S, Kardes N, Demiralp Y, Jurich M, Altan T., 2011, Evaluation of Stamping Lubricants in Forming Galvannealed Steels for Industrial Application, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133/6:061001-9.
3. Yanagida A, Azushima A., 2009, Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test, *Annals of the CIRP*, 58/1:247-250.
4. Bech J, Bay N, Eriksen M., 1998, A Study of Mechanisms of Liquid Lubrication in Metal Forming, *Annals of the CIRP*, 47/1:221-226.
5. Schmoedel D, Prier M, Staevs J., 1997, Topography Deformation of Sheet Metal during the Forming Process and Its Influence on Friction, *Annals of the CIRP*, 46/1:175-178.
6. J Berglund J, Brown CA, Rosén BG, Bay N., 2010, Milled die steel surface roughness correlation with steel sheet friction, *Annals of the CIRP*, 59/1:577-580.
7. Makinouchi A, Teodosiu C, Nakagawa T., 1998, Advance in FEM Simulation and its Related Technologies in Sheet Metal Forming, *Annals of the CIRP*, 47/2:641-649.
8. Vollertsen F, Hu Z., 2006, Tribological Size Effects in Sheet Metal Forming Measured by a Strip Drawing Test, *Annals of the CIRP*, 55/1:291-294.
9. Azushima A, Kudo H., 1995, Direct Observation of Contact Behaviour to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming, *Annals of the CIRP*, 44/1:209-212.
10. Figueiredo L, Ramalho A, Oliveira MC, Menezes LF, 2011, Experimental study of friction in sheet metal forming, *Wear*, 271/9-10:1651-1657.
11. Fratini L, Lo Casto S, Lo Valvo E., 2006, A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 172/1:16-21.
12. Weinmann KJ, Kernosky SK., 1996, Friction Studies in Sheet Metal Forming Based on a Unique Die Shoulder Force Transducer. *Annals of the CIRP*, 45/1:269-272.
13. Yanagida A, Azushima A., 2009, Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test. *Annals of the CIRP*, 58/1:247-50.