



Measuring the effect of the surface texture created by the shot peening process on the tribological performance in the deep drawing tool

Ömer Emre Uçakkuş*^{ID}, Adalet Zeren^{ID}, Tamer Sınmazçelik^{ID}, Caner Yalçın^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kocaeli University, 41001, Kocaeli, Türkiye

Highlights:

- Testing device design that simulates the tribological interaction in the deep drawing process
- Surface texture created by shot peening
- Examining the use of CrN PVD coating and deep drawing oil

Keywords:

- Tribology
- Lubrication
- PVD coating
- Surface texturing
- Deep drawing

Article Info:

Research Article

Received: 23.10.2023

Accepted: 19.03.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1380153

Acknowledgement:

This study, conducted at Ulus Metal San ve Tic AŞ Turkey, was supported Kocaeli University Scientific Research Project Unit (FDK-2022-3002). The author would like to thank Ulus Metal and Rozmas Celik Company employees who support the study

Correspondence:

Author: Ömer Emre Uçakkuş
e-mail: omeremreucakkus@gmail.com
phone: +90 262 677 1021

Graphical/Tabular Abstract

Innovative applications such as creating surface texture on the tools have been evaluated to keep the friction between the sheet metal and the tool surface at the expected level and to reduce wear. Since the actual contact area with the surface texture decreases, the friction coefficient decreases compared to the flat surface, especially in dry friction and in hot forming situations where lubricant can't be used. In all cases of friction, the wear products from the surface are trapped in the created textures. Thus, part quality and tool life could be increased. This study was carried out with a homemade testing device shown in Figure A that simulates exactly the movements of tool parts and sheet metal in the deep drawing process.

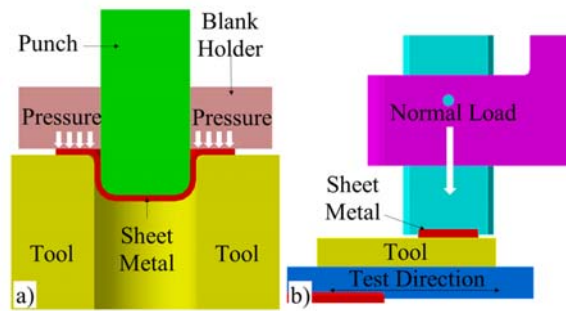


Figure A. The sheet metal under pressure in the deep drawing process a) the movement between the blank holder and the tool b) the simulation of the movement between the blank holder and the tool on the test device

Purpose: The tool surface texturing improves the tribological properties of reciprocating parts. Very limited studies have been found that examine industrial deep drawing parameters and the friction between the tool and sheet material during the deep drawing process by the process conditions. The aim of the study is to examine the friction conditions of the tool surfaces, whose surface texture was created by the shot peening process, with the test device developed to simulate deep drawing conditions.

Theory and Methods: 1.2379 tool steel samples were shot peened to create surface texture with different peening times. CrN PVD coating was applied to each surface of the peened samples. Material characterization and process tests including hardness, surface roughness, almen height, coverage and contact angle were carried out. Friction test experiments were conducted to assess the effect of the surface texture created by shot peening on coated and uncoated metal samples under dry and lubricant conditions by comparing them with flat sample results.

Results: Dry and liquid friction test results of uncoated and CrN coated textured surfaces were compared with flat surface test results. The kinetic friction coefficient decreased from 0.21 to 0.16 (25%) and from 0.15 to 0.06 (60%) in the case of dry and liquid friction, respectively. In CrN coated tribology tests, while there was no decrease in dry friction, the kinetic friction coefficient decreased from 0.09 to 0.05 (41%) in liquid friction.

Conclusion: Based on the experimental work carried out in this study, it was shown that hardness increases after shot peening, which led to decrease the friction coefficient despite the surface roughness increase. The lower friction means that the amount of force and energy required in the process of forming the sheet metal will decrease proportionally to these values. It is recommended to be prefer surface texturing in the deep drawing process as it reduces the wear of the mold and the energy spent during manufacturing.



Derin çekme kalıbında bilyalı dövme prosesi ile oluşturulan yüzey dokusunun tribolojik performans üzerindeki etkisinin ölçülmesi

Ömer Emre Uçakkuş*^{ID}, Adalet Zeren^{ID}, Tamer Sınmazçelik^{ID}, Caner Yalçın^{ID}

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 41001, İzmit, Kocaeli, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Derin çekme işlemindeki tribolojik etkileşimini simüle eden test cihazı tasarımı
- Bilyalı dövme ile yüzey dokusu oluşturma
- CrN PVD kaplama ve derin çekme yağı kullanımının incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.10.2023

Kabul: 19.03.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1380153

Anahtar Kelimeler:

Triboloji,
yağlama,
PVD kaplama,
yüzey dokusu,
derin çekme

ÖZ

Üretim teknolojilerinin gelişimine paralel olarak sürdürülebilirlik kapsamında sınırlı enerji kaynakları dikkate alındığında, düşük enerji sarfıyatı ile üretilebilen, hammadde ve iscarta miktarı en düşük olan, karmaşık geometrili ve yüksek mukavemetli parçalara olan talep artmaktadır. Bu tip parçaların üretilebileceği proseslerden en önemlilerinden birisi ise sac şekillendirme yöntemidir. Dar toleranslara sahip yüksek mukavemetli parçaların üretiminde, gerek parçanın gerekse kalıbın aşırı yüklemelere maruz kaldığı derin çekme prosesi yoğunlukla kullanılmaktadır. Aşırı yüklenmelerden dolayı meydana gelen sürtünme ve aşınmalara karşı, derin çekme kalıplarında tribolojik performansının yüksek olması beklenmektedir. Kalıp yüzeylerine doku oluşturma işlemi ise son zamanlarda dikkatleri üzerine çeken ve tribolojik performansı artıran yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada endüstriyel bilyalı dövme prosesi kullanılarak kalıp yüzeyinde yüzey dokusu oluşturulmuştur. Kaplamasız ve CrN kaplanmış dokulu yüzeyler üzerinde yapılan kuru ve sıvı sürtünme test sonuçları düz yüzey test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Kinetik sürtünme katsayısı kuru ve sıvı sürtünme durumunda sırasıyla 0,21'den 0,16'ya (%25) ve 0,15'ten 0,06'ya (%60) düşmüştür. CrN kaplanmış triboloji testlerinde ise kuru sürtünme durumunda düşüş olmazken sıvı sürtünme durumunda ise kinetik sürtünme katsayısı 0,09'dan 0,05'e (%41) düşmüştür.

Measuring the effect of the surface texture created by the shot peening process on the tribological performance in the deep drawing tool

H I G H L I G H T S

- Testing device design that simulates the tribological interaction in the deep drawing process
- Surface texture created by shot peening
- Examining the use of CrN PVD coating and deep drawing oil

Article Info

Research Article

Received: 23.10.2023

Accepted: 19.03.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1380153

Keywords:

Tribology,
lubrication,
PVD coating,
surface texturing,
deep drawing

ABSTRACT

In parallel with the development of production technologies and considering limited energy resources within the scope of sustainability, the demand for parts with complex geometry and high strength that can be produced with low energy consumption, with the lowest amount of raw materials and wastage, is increasing. One of the most important processes by which these types of parts can be produced is the sheet metal forming method. The deep drawing process, in which both the part and the tool are exposed to extreme loads, is widely used in the production of high-strength parts with tight tolerances. It is expected to have high tribological performance against friction and wear occurring in deep drawing tools due to overloads. The process of creating texture on tool surfaces is one of the methods that has attracted attention recently and increases tribological performance. In this study, surface texture was created on the tool surface using industrial shot peening processes. Dry and liquid friction test results on uncoated and CrN coated textured surfaces were compared with flat surface test results. The kinetic friction coefficient decreased from 0.21 to 0.16 (25%) and from 0.15 to 0.06 (60%) in the case of dry and liquid friction, respectively. In CrN coated tribology tests, while there was no decrease in dry friction, the kinetic friction coefficient decreased from 0.09 to 0.05 (41%) in liquid friction.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *omeremreucakkuş@gmail.com, adaletz@kocaeli.edu.tr, tamerse@kocaeli.edu.tr, caaneryalcin@gmail.com / Tel: +90 262 677 1021

1. Giriş (Introduction)

Sürtünmeye bağlı enerji kaybını ve aşınmayı en aza indirmek, üretim teknolojilerinin her birinde önemli bir hedeftir. Örneğin Çin'de, GSYİH'nin (Gayri Safi Yurtiçi Hasıla) %1,55'ine tekabül eden yılda 100 milyar yuanlık bir parasal kaynak, sürtünme ve aşınma nedeniyle kaybedilmektedir [1]. Sürtünme, sac metali şekillendirmek için gerekli olan en önemli parametredir; ancak özellikle derin çekme prosesinde meydana gelen yüksek şekillendirme kuvvetlerinin uygulanması esnasında oluşan aşırı sürtünme ve sürtünme kaynaklı aşınmanın etkilerini azaltmak için tribo çiftler (dişi kalıp (matris) - sac metal, erkek kalıp (zimba) - sac metal ve pot plakası - sac metal) arasındaki sürtünmenin mümkün olduğunca kontrol altına alınması gerekmektedir. Sürtünme ise yeni nesil kalıp malzemeleri, nano kaplamalar, uygun yağlayıcılar ve yüzey dokusu oluşturma gibi uygulamaların katkısıyla sac ve kalıp arasındaki tribolojik etkileşimin iyileştirilmesiyle kontrol altına alınabilir. Seri üretimde, sürtünmenin kontrol altında tutulabilmesi için yağlamanın kararlı ve sürdürülebilir bir etki göstermesi gerekmektedir. Bu etki kalıp yüzeylerinde oluşturulan yüzey dokuları ile iyileştirilebilir. Kalıp yüzeyindeki dokular, rezervuar etkisi göstererek yağı tutmaktadır. Dokularda tutulan yağ, aşınma ve ısınma etkilerini en aza indirdiği için dokular tribolojik performansı arttıran unsurlardan birisidir. Bu nedenle konu üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün önemini arttırmaktadır [2, 3]. Karşılıklı olarak hareket eden parça ara yüzeylerinde kuru (yağlamasız), sınır, karma ve sıvı (viskoz) sürtünme durumları meydana gelebilmektedir. Sac metal şekillendirme yönteminde birkaç temel yağlama türü geçerli olmakla birlikte, sınır yağlama ağırlıklı olarak söz konusudur. Sınır yağlama, metal yüzey üzerinde bulunan ince filmler tarafından oluşturulur. Kuru koşullarda olduğu gibi, sürtünme yüksektir. Karma yağlama, derin çekmede hâkim olan yağlama türüdür. Derin çekme prosesinde düşük hızlarda yüzeyde yüksek basınç oluştuğundan, bu süreçte hidrodinamik koşulların oluşumu sınırlıdır. Kalıp yüzeyinde oluşturulan dokulardaki yağlayıcılar derin çekme sırasında hidrostatik etki oluşturarak sac metalin hareketini kolaylaştırır ve sürtünmeyi azaltır [2, 4]. Sac ile kalıp yüzeyi arasında sürtünmeyi istenilen seviyede tutmak, aşınmayı azaltmak için kalıplarda yüzey dokusu oluşturma gibi inovatif uygulamalar değerlendirilmiştir. Yüzey dokusu, pürüzlülüğünden farklı olarak yüzeylere belirli geometride, ölçüde ve dağılımda mikro şekiller oluşturma işlemidir. Yüzey dokusu oluşturulan yüzeylerde gerçek temas alanı azalacağından dolayı özellikle kuru sürtünme durumunda ve yağlayıcının kullanılmadığı sıcak şekillendirme durumlarında sürtünme katsayısı düz yüzeye kıyasla daha düşük çıkmaktadır. Bütün sürtünme durumlarında ise yüzeyden kopan parçalar, oluşturulan dokulara hapsolünmektedir. Böylece parça kalitesi ve kalıp ömrü artmaktadır. Yüzey dokusu ile oluşan hidrostatik yağlama durumu, sac ile kalıp arasındaki teması azaltarak sürtünme katsayısının azalmasını sağlar. Dokularda yağ bulunması, bu yağın sıkışıp üzerine etkileyen yükü kaldırabilecek şekilde bir karşı kuvvet oluşturmasını sağlar, yağlamayı daha etkili hale getirerek sonuçta sürtünme katsayısını azaltmaktadır [5-7]. Bu nedenle kalıp yüzeylerine doku açılmasının tribolojik özellikler üzerinde sinerjik bir etki yarattığı söylenebilir. Ek olarak, yüzey dokusu, yüzey aşınma direncine etki eden ıslanabilirliği ve sürtünme yapışma faktörünü de etkilemektedir.

Literatürde yüzey dokuları ile ilgili farklı uygulamalarda kuru ve sıvı sürtünme durumlarında, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan birçok çalışma bulunmaktadır. Mao vd., lazer yüzey dokusu üzerine yaptıkları araştırmalar sonrasında, lineer dokulu Al_2O_3/TiC kompozit ve dairesel dokulu dökme demir numuneleri için kuru sürtünme durumunda sürtünme katsayılarının sırasıyla %16,7 ve %57,9 azaldığını gözlemlemişlerdir [8]. Sıvı yağlayıcıların kullanılmadığı sıcak şekillendirme proseslerinde aşınma direncini arttırmak için

yüzey dokusunun kullanıldığı örnekte, Sun vd., 500°C sıcaklıkta bir adet düz yüzey ve altı farklı çapta yüzey dokulu TC11 alaşımını incelemiştir. Dokuların tribooksitleri, dokusuz yüzeylere göre daha iyi hapsederek aşınma direncini arttırdığı ve küçük çaplı ve yüksek yoğunluklu dokulu yüzeyin TC11'in tribolojik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir [9]. Sıvı sürtünme durumunda ise dokular hidrodinamik yağ film kalınlığını artırarak yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Yapılan çalışmada lineer dokulu sement karbür ve dairesel dokulu T8 çeliği üzerinde yapılan sürtünme testleri sonrası sürtünme katsayıları sırasıyla %46,1 ve %80,1 oranlarında azaltılmıştır [8,10]. Zhang vd., kimyasal yöntem ile yüzey dokusu oluşturulan Cr12 malzemesi ile yaptıkları testlerde, yüzey dokusunun yüksek yük koşullarında tribo çiftleri arasındaki sürtünme katsayısını ortalama %35,6 oranında azalttığını gözlemlemiştir; ancak test sistemi tam olarak gerçek koşulları simüle etmemektedir [11]. Literatürde, yüzeye doku oluşturma tribolojik sistemlerin olumlu etkilerine yönelik birçok çalışma olmasına rağmen elde edilen sonuçların etkinliğinin nedenleri üzerine çalışmalar halen devam etmektedir.

Derin çekme prosesinde yüzey dokusu kullanımı ile ilgili literatürde çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Maldonado vd., derin çekme prosesinde yüzey dokusu etkisini incelemek üzere testlerini block-on-ring tipi deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Bu sistem, derin çekme prosesinde sac malzeme ve kalıp arasındaki etkileşimi bire bir modelleyen bir sistem değildir. Ancak yapılan çalışmalarda hem sürtünme katsayısında hem de aşınma hacminde önemli derecede azalma olduğu gözlemlenmiştir [12]. Franzer vd., haddeleme prosesinde kullanılan yüzeyi makroskobik yüzey dokulu kalıbı incelemiştir. Çalışma konusu derin çekme olmasına rağmen, hem düz şerit çekme işlemi incelenmiştir hem de çalışmadaki amaç sürtünmeyi arttırmaktır [13]. Vrbka vd., bilyalı dövmenin (shot peening), karma yağlama koşulları altında yuvarlanma teması yorulması ve yağlayıcı film kalınlığı üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, uygun şekilde tasarlanmış yüzey dokusu, karışık yağlamalı yuvarlanan/kayan kontaklarının temas yorulma ömrünü ve yağ filmlerinin verimliliğini arttırmaktadır [14]. Nakano vd., bilyalı dövme işlemi ile oluşturdukları lineer ve yarı küre dokular ile yapmış oldukları testleri düz yüzeyler ile karşılaştırmışlardır. Test sonuçlarına göre lineer dokuların sınır yağlama oluşturdıkları için sürtünmeyi arttırdığı; yarı küre dokuların ise bölgesel hidrodinamik yağ etkisi sağladığı için sürtünmeyi azalttığı gözlemlenmiştir [15]. Harun Arda'nın çalışması kapsamında, AISI 316 ve Ti6Al4V malzemelerine üç farklı Almen şiddetinde bilyalı dövme işlemi uygulandıktan sonra, numuneler disk tipi test cihazında kuru ve sıvı sürtünme durumunda test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerinin malzeme özelliklerinin önemli derecede etkilediği, tribolojik davranışlarında etkin rol oynadığı sonucuna varılmıştır [16]. Gül vd., magnetron sıçratma ile Tantal-Oksit kaplama öncesi uygulanan alkali, alkali-asit ve kumlama yüzey işlemlerinin 7075 Alüminyum alaşımının aşınma davranışına etkilerini incelemiştir. Altı farklı deney grubundan özellikle kaplamasız kumlanmış yüzeyin aşınma davranışı ve sürtünme katsayısı kumlanmış kaplanmış yüzeye göre daha iyi çıktığı gözlemlenmiştir [17]. Fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal üretim teknolojileri ile oluşturulan dokuların yukarıda da özetlendiği gibi mekanik sistemlerin verimini arttırdığı birçok örnek olmasına rağmen uygun geometride, ölçülerde ve yoğunlukta açılmayan dokular, sistemin sürtünme katsayısını artırarak aşınma direncinin düşmesine neden olabilmektedir [18, 19].

Sürekli gelişim halinde olan yüzey doku oluşturmaya yönelik çalışmaların önemli bir kısmı son yirmi yılda yapılmıştır. Şekil 1a, Şekil 1b ve Şekil 1c'deki istatistiksel veriler, çalışmamızda bizi sac şekillendirme kalıpları üzerindeki yüzey dokusunu incelemeye yönlendirmiştir [19]. Ayrıca endüstriyel derin çekme parametreleri ile

derin çekme işlemi sırasında kalıp ve sac malzeme arasındaki sürtünmeyi bire bir (gerçek proses şartlarına uygun olarak) inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak için, çalışma kapsamında geliştirilen test cihazı ile derin çekme koşullarını bire bir simüle edilmiş ve bilyalı dövme prosesi ile yüzeyine doku oluşturulan kalıp numunelerinin sürtünme testleri yapılarak sonuçlar tartışılmıştır.

2. Deneysel Metotlar (Experimental methods)

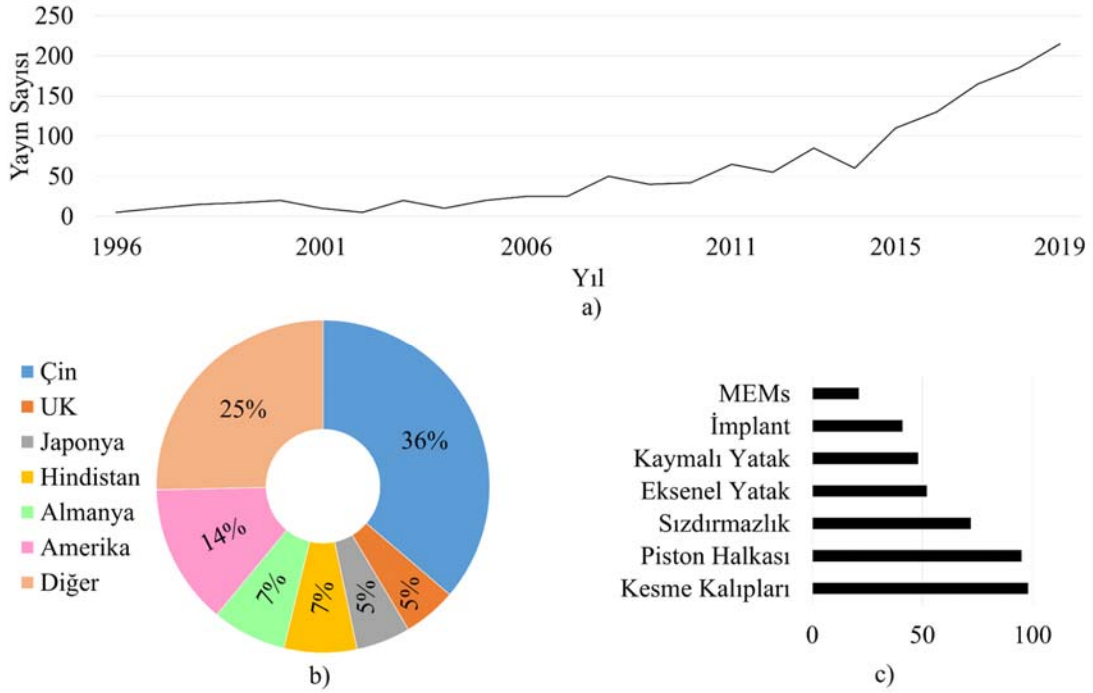
2.1. Malzemeler ve Hazırlama Teknikleri (Materials and Preparation Techniques)

Deneysel çalışmalarda derin çekme prosesine uygun sac metal ve kalıp malzeme çifti kullanılmıştır. Sac metal DD13 (EN 10111:2008) kalite malzemeden 20 x 20 x 5 mm ölçülerinde; kalıp malzemesi ise 1.2379 (EN X155CrMoV12) soğuk iş takım çeliğinden 60 x 40 x 10 mm ölçülerinde tel erezyon prosesi ile kesilerek hazırlanmıştır. DD13 ve 1.2379 malzemelerinin kimyasal bileşimleri Tablo 1’de; mekanik özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

2.2. Tribolojik Testler (Tribological Tests)

Şekil 2’de gösterilen tribolojik test cihazı, ISO 15359, ISO 8295 ve ASTM D 1894 standartlarındaki gereklilikleri yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır ve üretilmiştir (faydalı model ve tasarım tescili alınmıştır). Cihaz sürtünme, aşınma ve yüzey çizilme testleri yapabilmektedir. Kuvvet ölçüm aralık değerleri 0,5 – 50,0 ± %0,5 N ve hareket hızı aralığı ise 1,0 – 30,0 mm/s olarak seçilmiştir. Bu test cihazının en önemli özelliği, sac şekillendirme yöntemlerinde ve özellikle derin çekme yönteminde kalıp ile sac malzeme arasında oluşan temas ve hareket özelliklerini tam olarak simüle edebilmesidir.

Derin çekme prosesinde kalıp parçaları ile sacın hareketleri Şekil 3a’da gösterildiği gibidir. Sac metal, kalıp (dişi kalıp) üzerine konumlanmakta ve zımbanın saca teması anında basınç etkisi ile pot plakası ile kalıp arasında yatay yönde hareket etmektedir. Böylece şekillendirme (hareket) esnasında birbirine paralel iki levha arasında basınç altında sürtünme meydana gelmektedir [22]. Bu sürtünme davranışını en gerçekçi koşullarda simüle etmek için tasarladığımız ve tasarım tescili alınan Şekil 3b’de gösterilen test cihazında sac



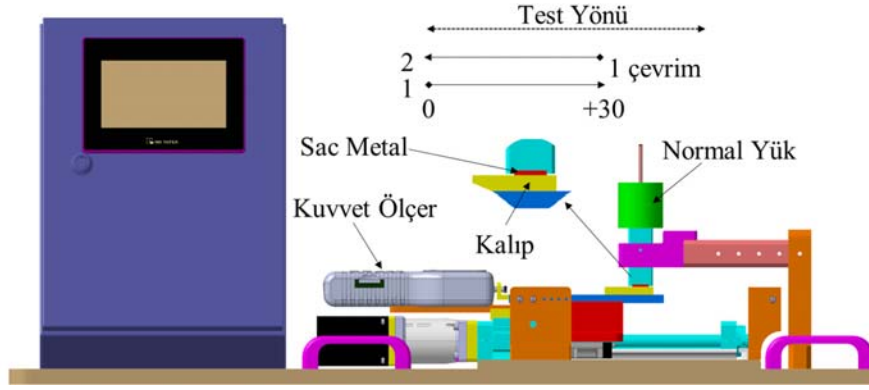
Şekil 1. a) 1996’den bugüne tribolojik yüzey dokusu üzerine yayınlanan makale sayısı b) farklı bölgelerin katkıları c) yayınlanan makalelerin uygulama alanları (a) number of papers published on tribological surface texturing since 1996 b) contributions of different countries/regions c) Main application areas of these papers) [19]

Tablo 1. DD13 ve 1.2379 malzemelerinin kimyasal bileşimleri (Chemical compositions of DD13 and 1.2379 steel) [20, 21]

Malzeme		C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
DD13-6224	Katalog değeri	max 0,07	max 0,35	max 0,025	max 0,025	-	-	-	-
EN 10111:2008	Ölçüm	0,05	0,23	0,014	0,004	0,04	0,04	0,005	0,007
(DIN) 1.2379	Katalog değeri	1,45	0,20	0,030	0,030	0,10	11,00	0,60	0,90
(EN) X155CrMoV12	Ölçüm	1,47	0,36	0,240	0,004	0,36	11,60	0,77	0,77

Tablo 2. DD13 ve 1.2379 malzemelerinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of DD13 and 1.2379 steels) [20, 21]

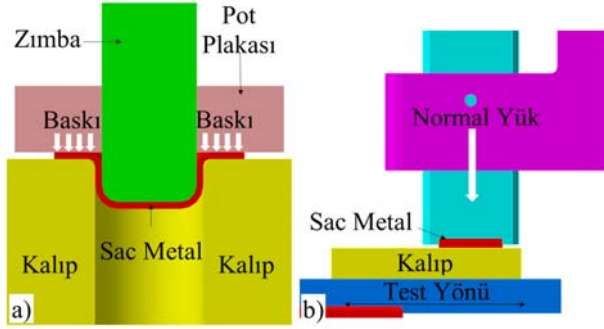
Malzemeler		R_e [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_5 [%]	Sertlik [HV]
DD13 (6224)	Katalog değeri	170 – 310	400	33	125
	Ölçüm	256	368	38,7	
1.2379	Katalog değeri	-	2145	-	620-660



Şekil 2. Test cihazı (Test device)

malzeme, normal yük altında kalıp numunesi üzerinde hareket etmektedir. Columb yasasına göre sürtünme katsayısı (μ), yüzeyler arasında meydana gelen sürtünme kuvvetinin (F_s) (test cihazında sac ve kalıp ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuvveti ölçülerek uygulanan normal yüke (F_N) oranı ile hesaplanmıştır [2].

doku açılmamış düz yüzeye sahip ve doku açılmış kalıp çeliği üzerinde hareket etmektedir. Bu şekilde yapılan test sonuçları Şekil 4a'da gösterildiği üzere "Kuru" ile kodlanmıştır. İkinci grup testler ise sac ve kalıp arasında sıvı derin çekme yağı (0.5 ml DRAWTEX KC70- 85 cSt @40°C viskozite) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yapılan test sonuçları Şekil 4b'de gösterildiği üzere "L1" ile kodlanmıştır.

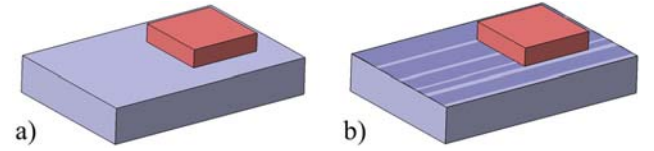


Şekil 3. Derin çekme prosesinde baskı altındaki sacın a) pot plakası ile kalıp arasındaki hareketi b) pot plakası ile kalıp arasındaki hareketinin test cihazı üzerindeki simülasyonu (kırmızı daire ile belirtilen bölge).

(The sheet metal under pressure in the deep drawing process a) movement between the blank holder and the tool b) simulation of the movement between the blank holder and the tool on the test device (Region indicated by red circle)

İklimlendirilmiş laboratuvar şartlarında, her bir numune için 30 mm uzunluğundaki sürtünme testleri, 10'ar tekrar ile yapılmıştır. Uygun yük ve hız parametrelerini belirlemek için kaplamasız ve dokusuz düz yüzey üzerinde; 1 mm.s⁻¹, 5 mm.s⁻¹, 10 mm.s⁻¹, 15 mm.s⁻¹, 20 mm.s⁻¹ ve 25,0 mm.s⁻¹ hızlarda ve 0,668 kg, 1,164 kg ve 2,638 kg yüklerde testler yapılmıştır. Test sonucunda oluşturulan kuvvet ve yol grafiğinden sürtünme enerjileri hesaplanmıştır. Sürtünme enerjisi sonuçlarına göre, çalışma kapsamında yapılacak testler için uygulanacak parametreler: yük için 2.638 kg ve hız için 10 mm.s⁻¹ seçilmiştir. Malzemelerin yüzey özellikleri test sonuçlarını etkileyebilmektedir. Tüm sonuçların kararlı olmasına rağmen, sapmayı en aza indirmek için sıralamadaki en küçük ve en büyük üçer adet test sonuçları dikkate alınmamıştır. Kalan dört adet test sonucunun ortalaması, test grubunu temsil eden deneysel sonuç olarak değerlendirilmiştir. Dokulu yüzeylerden elde edilen sonuçlar kaplamasız ve kaplamalı düz yüzey sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Kaplamasız ve PVD yöntemi ile 3,0 μm kalınlığında CrN kaplı (C1 ile kodlanacaktır, katalog değeri 2 – 10 μm) kalıp numunesi üzerindeki tribolojik testler iki farklı koşul altında gerçekleştirilmiştir. Birincisinde sac parça kuru (yağlama olmayan durum) koşullarda



Şekil 4. a) Kuru sürtünme, b) sıvı sürtünme durumu (a) dry friction, b) lubricated friction conditions)

2.3. Kalıp Yüzey Dokusu (Tool Surface Texturing)

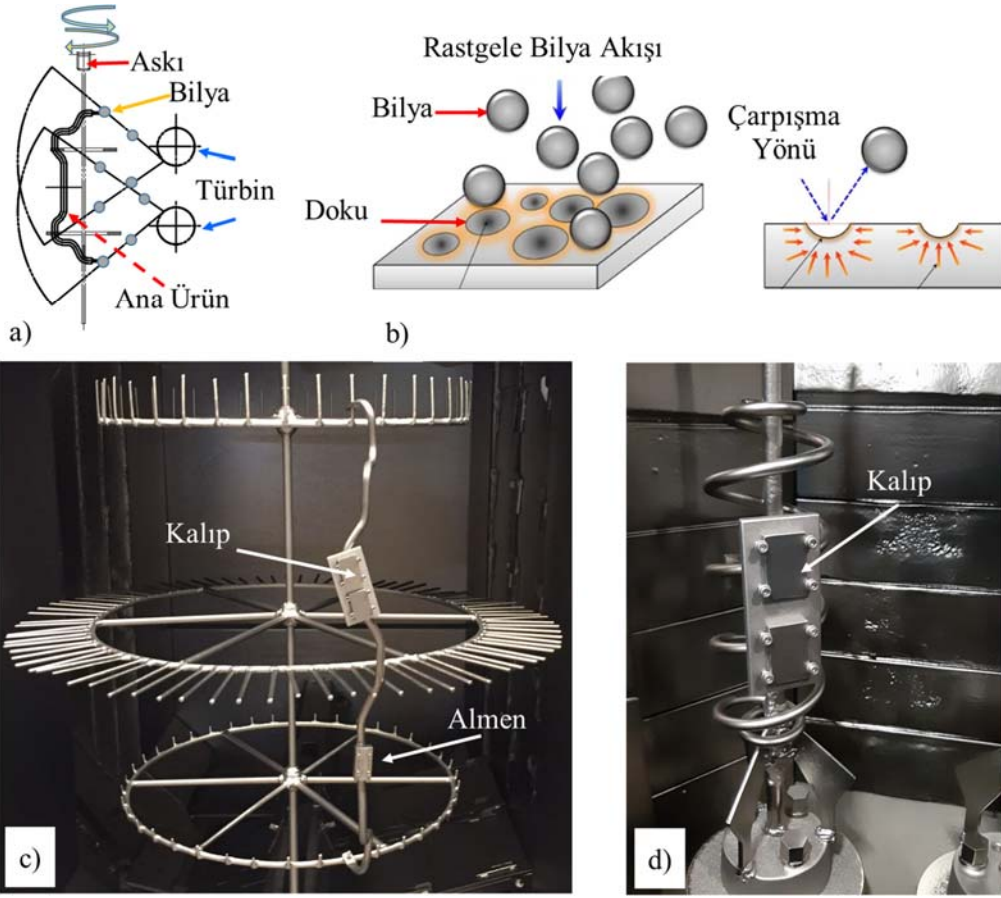
Şekil 5a'da bilyalı dövme prosesi şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 5b'de ise yüzeylerde rastgele bilya akışı ile oluşan dokular belirtilmiştir [23, 24]. Kalıp numuneleri yüzeyine doku oluşturmak için tel ereyon ile 60 x 40 x 10 mm ölçülerinde kesilen parçalara 56-58 HRC sertlik değerini elde etmek için ısıtım işlemi uygulanmıştır. Kalıp numuneleri üzerine doku oluşturma işlemi Şekil 5c, Şekil 5d'de gösterildiği üzere endüstriyel bilyalı dövme makinelerinde ve Tablo 3'te belirtilen farklı proses süreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Her makine için sekiz adet kalıp numunesine Tablo 3'te belirtilen sürelerde bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Makinelerde kullanılan bilyaların özellikleri ve kumlama sonrası bilya çaplarının dağılımı sırasıyla Tablo 4'te ve Şekil 6'da verilmiştir.

Bilyalı dövme sonrası yüzeyde bilya ile dövülmüş ve deformasyona uğramış yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı "yüzey örtme oranı" (coverage) olarak bilinmektedir [24]. Şekil 7a'da bilyalı dövme sonrası Almen plakalarının yüzeyindeki yüzey örtme oranına ilişkin görüntü verilmiştir. Aynı şekilde her deney grubu için kullanılan almen plakası üzerinden de almen değerleri Şekil 7b'de gösterildiği üzere ölçülmüştür.

2.4. Kontak Açısı Ölçümleri (Contact Angle Measurement)

Kontak açısı, sıvı damlacığın yüzey ile yaptığı açıdır. Yüzey ile yapılan açı 90°'den küçük ise yüzey hidrofilik (ıslatılabilir); 90°'den büyük ise hidrofobik (ıslatılmaz) olarak tanımlanır [25]. Numunelerin yüzeylerine farklı yöntem ve parametrelerle yüzey dokusu oluşturulduktan sonra, yüzey enerjilerinin ve pürüzlülüklerinin durumuna göre ortaya çıkan yüzey özelliklerindeki



Şekil 5. a) Bilyalı dövme prosesi metodu b) yüzey dokusu c) I nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi d) II nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi (a) shot peening process method b) surface texture c) Industrial shot peening process I, d) Industrial shot peening process II)

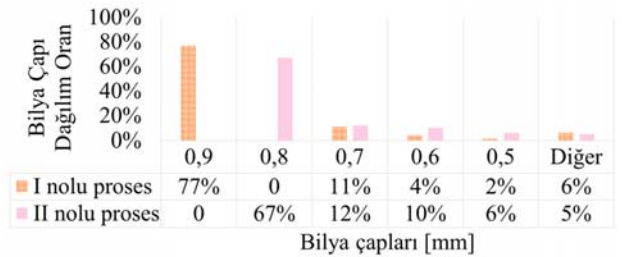
Tablo 3. Bilyalı dövme süresi (shot peening process times)

Prosesler / Numuneler	Bilyalı Dövme Süresi - [s]							
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
I nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi	30	60	90	120	150	180	210	240
II nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi	10	12	14	16	17	18	19	20

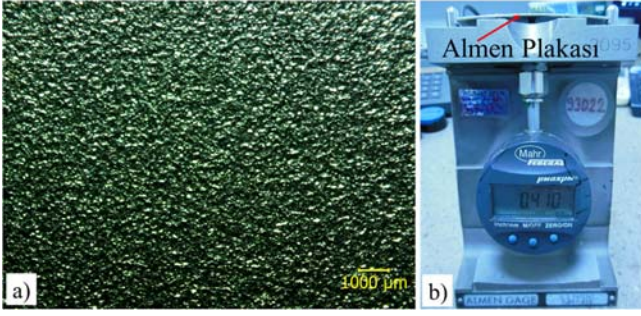
Tablo 4. Bilya özellikleri (peening media properties)

Makine/Proses	Bilya Özellikleri			
	Kalite	Malzeme	Sertlik	Çap
	[-]	[-]	[HV]	[mm]
I nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi	G1	Peenox CS	640	0,9
II nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi	G2			0,8

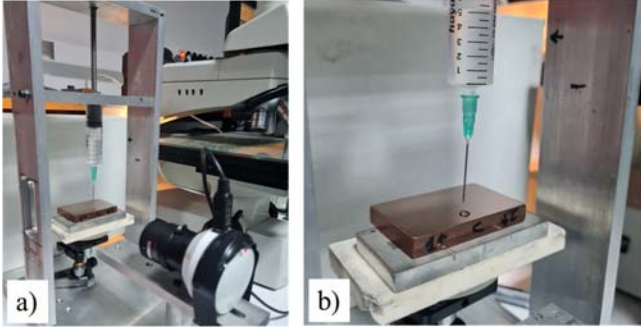
değişimlerini belirlemek için kontak açısı ölçümleri yapılmıştır. $\pm 2^\circ$ sapma ile çalışan kontak açısı ölçüm cihazı ile her bir numuneden 5 tekrarda ölçüm yapılmış ve standart sapma değerleri göz önünde bulundurularak ortalama değerler alınmıştır. Kontak açısı ölçüm cihazında her bir numune yüzeyine bir şırınga yardımıyla yaklaşık olarak 40 mm mesafeden saf su damlatılmış ve yüzeye damlatılan damla kararlı hale geldikten sonra (yaklaşık 20 sn.) düzenekte bulunan kamera yardımıyla 0,5 saniye aralıklarla alınan fotoğraf kareleri kullanılarak kontak açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, "Image-j" programı uygulaması olan "Drop analysis" ile belirlenmiş olup Şekil 8a'da kullanılan kontak açısı ölçüm cihazı görülmektedir. Şekil 8b'de ise numune üzerine örnek uygulama gösterilmektedir.



Şekil 6. Proses sonrası elek analiz sonuçları (Sieve analysis results after process)



Şekil 7. a) Örtücülük incelemesi b) almen testi (a) coverage examination, b) almen test)



Şekil 8. a) Kontak açısı ölçüm cihazı b) numune üzerinde uygulama (a)contact angle test device b)application on the part)

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussions)

Statik sürtünme katsayısı, hareket başlamadan önce (ya da hareketin başladığı esnada) temas halindeki yüzeyler arasındaki maksimum sürtünme kuvvetinin (F_s) normal (F_N) yüke oranıdır. Dinamik sürtünme katsayısı ise, bir nesne hareket ederken ölçülen, denge halindeki sürtünme kuvvetidir. "Sürtünmeye karşı iş" veya "Sürtünme enerjisi", mesafe boyunca sürtünme kuvvetinin fonksiyonu şeklinde hesaplanır.

Tablo 5'te I nolu proses ile oluşturulan kaplanmamış dokulu yüzeylerin sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsayıları sonuçları ile yüzeyi kaplanmamış düz yüzeye (yüzey dokusu olmayan) sahip kalıp numunesinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Düz yüzey için kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjisi 144,5 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayıları da sırasıyla 0,22 ve 0,21 olarak hesaplanmıştır. I nolu makinede kuru sürtünme durumunda bütün

dokulu yüzeylerin sürtünme enerjisi değeri, düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Kaplanmamış dokulu yüzeylerde sürtünme enerjisi %25 (107,66 N.mm) ve kinetik sürtünme katsayısı %25 (0,16) oranında azalmıştır. Çap 0,9 mm bilya ile oluşturulan dokuların kalıp ile sac arasındaki gerçek temas alanını ve kohezyon kuvvetlerini azaltması sebebiyle bütün numunelerde sürtünme katsayısı, referans numuneye göre düşük çıkmıştır [16, 26]. Tablo 9'da 180 saniye ve üzerindeki bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerin (I-N.6, 7, 8) Almen değerleri incelendiğinde prosesin doygunluk sınırına ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle en iyi sonuç 4 ve 5 numaralı numunelerde elde edilmiştir.

Düz yüzey L1 yağlı sıvı sürtünme durumunda ise sürtünme enerjisi 102,5 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayısı sırasıyla 0,09 ve 0,15 olarak hesaplanmıştır. I nolu makinede sıvı sürtünme durumunda 3 ve 6 nolu numuneler hariç numunelerin sürtünme enerjisi değerleri düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Sürtünme enerjisi %59 (42,42 N.mm) ve kinetik sürtünme katsayısı %60 (0,06) oranında iyileştirilmiştir. Normal şartlar altında, yağlı ortamda sıvı sürtünme durumunda oluşan dokular yükün etkisiyle hidrostatik karşı basınç oluşturarak tribo çiftlerin temas oranlarını azaltır. Böylece sınır yağlama durumundan hidrostatik yağlama koşuluna geçiş ile sürtünme katsayısı azalır; ancak dokuların geometrisi yük altında hareket eden sacın kalıba yaptığı etkiyle birlikte ortaya çıkan hidrodinamik etki akışkanlar mekanikliği ilkelerine uygun olarak davranış değiştirmektedir. Uygun şartlarda sınır yağlama koşulları oluşmadığında yağ, istenilen şekilde yağlayıcılık özelliğini göstermemektedir. Mikro seviyede de olsa aşınma ürünlerinin oluşan haznelere dolması, hareket esnasında sacın ve karşı yüzeyin (kalıbın) tepe ve vadi arasında biriken aşınma ürünleri gerek kuru gerek yağlı ortamlarda üç cisimli abrasif aşınmaya neden olabilmektedir. Dolayısıyla sınır yağlama şartları sağlanmayan durumlarda halen geçerli olan abrasif aşınma mekanizmaları hatta yağın yüzeylerle olan kohezyon kuvvetleri sürtünme katsayısının artmasına neden olabilir. Numunelerin yüzeyleri hidrofilik olup kontak açıları 46,8° ile 50,8° arasındadır. Yüzeyin ıslanabilir olmasına rağmen kuru sürtünme durumuna göre "% değişim oranları" numune grupları arasında farklılık göstermesi ve iki (I-N.3, 6) numunenin yüksek çıkması kalıp ile sac arasındaki tepeliklerin etkileşim durumlarından [16, 23].

Tablo 6'da I nolu proses ile oluşturulan dokulu kaplanmamış yüzeylerin sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsayısı sonuçları, çalışma kapsamında yüzeyi kaplanmamış optimum düz yüzeye sahip kalıp numunesinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Düz yüzeyin kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjisi 75,0 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,12 ve 0,11 olarak hesaplanmıştır. Sekiz numunenin de sürtünme enerjisi değeri kaplamalı düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır.

Tablo 5. I nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesinde oluşturulan kaplamasız malzemelerde yüzey dokulu numunelerin ve yüzey dokusuz numunelerin sürtünme test sonuçları
(Uncoated textures, Industrial shot peening process I, friction test results and comparison of textured and untextured surface)

Yüzey Durumu	Sürtünme Enerjisi (E_s)		Sürtünme Katsayısı ₁ (statik)		Sürtünme Katsayısı ₁ (kinetik)	
	[N.mm]		Birimsiz		Birimsiz	
	Kuru	L1	Kuru	L1	Kuru	L1
Kaplamasız Düz Yüzey (REF)	144,50 %	102,50 %	0,22 %	0,09 %	0,21 %	0,15 %
	değişim	değişim	değişim	değişim	değişim	değişim
I-N.1	113,57 -21%	96,45 -6%	0,15 -30%	0,20 119%	0,16 -22%	0,14 -8%
I-N.2	117,64 -19%	42,42 -59%	0,20 -10%	0,13 43%	0,17 -19%	0,06 -60%
I-N.3	124,16 -14%	132,32 29%	0,19 -12%	0,13 42%	0,18 -15%	0,19 29%
I-N.4	108,94 -25%	85,55 -17%	0,17 -21%	0,09 2%	0,16 -25%	0,13 -16%
I-N.5	107,66 -25%	45,18 -56%	0,19 -13%	0,15 70%	0,16 -25%	0,06 -58%
I-N.6	121,04 -16%	132,76 30%	0,17 -21%	0,12 36%	0,18 -16%	0,19 28%
I-N.7	113,55 -21%	94,15 -8%	0,18 -17%	0,07 -18%	0,16 -22%	0,14 -9%
I-N.8	122,88 -15%	86,58 -16%	0,21 -5%	0,05 -42%	0,18 -16%	0,12 -17%

Kaplamalı düz yüzeyin L1 yağlı sıvı sürtünme durumunda ise sürtünme enerjisi 73,0 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,10 ve 0,09 olarak hesaplanmıştır. 1 ve 8 numaralı numuneler hariç diğer numunelerin sürtünme enerjisi değeri düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır; en iyi sonuç ise 1 numaralı numune üzerinden elde edilmiştir. 1 numaralı numunenin sürtünme enerjisi %50 (36,64 N.mm) ve kinetik sürtünme katsayısı %41 (0,05) oranında azalmıştır. Kaplamanın, geometrik dokuların oluşturulduğu yüzeylerin kuru ve sıvı sürtünme durumlarında tribolojik özelliklerini çoğunlukla iyileştirdiği bilinmektedir. Bilyalı dövme prosesine benzer yöntemler ile açılan rastgele dokularda kaplama malzemesi yüzeyde oluşan dokunun geometrisini ve ölçülerini mikronlar mertebesinde de olsa değiştirmektedir. Bu nedenle de kaplama sürtünme katsayısını azaltan ve artıran yönde davranabilmektedir [3]. Özellikle yağlı deneylerde, yük altında doku (hazne) içinde tutulan yağda oluşan hidrostatik ve hidrodinamik etkiler değişmektedir. Bu durum daha iyi bir karşı basınç oluşturabilir ya da sınır yağlamada olumlu sonuçlar doğurabileceği gibi yağ filminin kesilmesine ve sürtünme katsayısının artmasına da neden olabilmektedir. Diğer yandan kaplamalı kalıp malzemesinde, aşınma eğilimi de oldukça azalacaktır. Dolayısıyla aşınan kalıp malzemesinin üç cisimli abrasif aşınmaya neden olma eğilimi azalacaktır. Fakat diğer yandan sac ile kalıp arasındaki sertlik farkı artacağından, sac malzemede aşınma eğiliminin artması ve aşınma ürünlerinin sürtünme sürecinde sürtünme katsayısını ve aşınma miktarını arttırması söz konusu olabilmektedir [27, 28]. Tablo 9'a göre 8 numunenin de yüzey enerjilerinin birbirlerine yakın çıkmasına rağmen, sıvı sürtünme durumunda sürtünme enerjisinin 1 ve 8 numaralı numuneler hariç diğer numunelerin yüksek çıkması

hatta aralarındaki farkların yüksek olması yukarıda bahsedildiği gibi üç cisimli abrasif aşınma durumundan oluştuğu değerlendirilmiştir. Tablo 7'de II nolu proses ile oluşturulan kaplanmamış dokulu yüzeylerin sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsayıları sonuçları ile yüzeyi kaplanmamış düz yüzeye (yüzey dokusu olmayan) sahip kalıp numunesinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Düz yüzeyin kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjisi 144,5 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayısı sırasıyla 0,22 ve 0,21 olarak hesaplanmıştır. 2 numaralı yüzey hariç bir iyileşme gözlemlenmemiştir. 2 numaralı numunenin sürtünme enerjisi %10 (129,52 N.mm) ve kinetik sürtünme katsayısı %11 (0,19) oranında azalmıştır. Düz yüzey L1 yağlı sıvı sürtünme durumunda ise sürtünme enerjisi 102,5 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,09 ve 0,15 olarak hesaplanmıştır. Sadece 4 ve 8 numaralı numunenin sürtünme enerjisi düz yüzeye göre düşük çıkmıştır; en iyi sonuç ise 8 numaralı numune üzerinden elde edilmiştir. 8 numaralı numunenin sürtünme enerjisi %35 (66,41 N.mm) ve kinetik sürtünme katsayısı %36 (0,10) oranında azalmıştır. Şekil 6'da gösterildiği üzere II nolu proses ile doku oluşturulan yüzeylerin hem 0,8 mm çaplı bilya ile kaplanma oranları hem de Almen yükseklikleri, I nolu prosesdeki yüzeylere göre düşük çıkmıştır. Yukarıda yapılan açıklamalarda da belirtildiği üzere oluşturulan dokuların geometrileri ve boyutlarının uygun olmaması durumunda, yüzeyler arasında yağ olmasına rağmen uygun yağlama şartları oluşmamasına neden olabilmektedir. Yağ filminin kesilmesi, aşınma ürünlerinin devreye girmesi ile üç cisimli abrasif aşınma şartlarının oluşması, aşınma ürünlerinin oluşan dokular içine birikmesi ve adhezyonu arttırması gibi sebeplerden dolayı dokular istenilen sonuçları vermemiştir.

Tablo 6. I nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesinde oluşturulan kaplamalı dokuların sürtünme test sonuçları ve kaplamalı düz yüzey ile karşılaştırılması
(Coated textures, Industrial shot peening process I, friction test results and comparison with coated flat surface)

Yüzey Durumu	Sürtünme Enerjisi		Sürtünme Katsayısı _(statik)		Sürtünme Katsayısı _(kinetik)	
	[N.mm]		Birimlessiz		Birimlessiz	
	C1→Kuru	C1→L1	C1→Kuru	C1→L1	C1→Kuru	C1→L1
Kaplamalı Düz Yüzey (REF)	75,00 % değişim	73,00 % değişim	0,12 % değişim	0,10 % değişim	0,11 % değişim	0,09 % değişim
I-N.1	120,63 61%	36,64 -50%	0,22 80%	0,07 -34%	0,17 58%	0,05 -41%
I-N.2	127,26 70%	180,84 148%	0,21 79%	0,15 47%	0,18 67%	0,27 196%
I-N.3	127,33 70%	104,79 44%	0,19 58%	0,06 -36%	0,18 66%	0,15 70%
I-N.4	133,48 78%	96,51 32%	0,23 92%	0,05 -53%	0,19 74%	0,14 57%
I-N.5	134,57 79%	159,01 118%	0,24 96%	0,16 59%	0,19 76%	0,23 157%
I-N.6	119,20 59%	84,78 16%	0,20 65%	0,00 -97%	0,17 56%	0,12 37%
I-N.7	145,29 94%	157,87 116%	0,25 105%	0,03 -68%	0,21 91%	0,23 159%
I-N.8	131,67 76%	48,33 -34%	0,17 42%	0,05 -53%	0,19 72%	0,07 -22%

Tablo 7. II nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesinde oluşturulan kaplamasız dokuların sürtünme test sonuçları ve düz yüzey ile karşılaştırılması
(Uncoated textures, Industrial shot peening process II, friction test results and comparison with untextured surface)

Yüzey Durumu	Sürtünme Enerjisi		Sürtünme Katsayısı _(statik)		Sürtünme Katsayısı _(kinetik)	
	[N.mm]		Birimlessiz		Birimlessiz	
	Kuru	L1	Kuru	L1	Kuru	L1
Kaplamasız Düz Yüzey (REF)	144,50 % değişim	102,50 % değişim	0,22 % değişim	0,09 % değişim	0,21 % değişim	0,15 % değişim
II-N.1	166,35 15%	207,48 102%	0,24 9%	0,16 73%	0,24 15%	0,30 103%
II-N.2	129,52 -10%	115,36 13%	0,21 -6%	0,03 -68%	0,19 -11%	0,17 12%
II-N.3	165,87 15%	156,10 52%	0,25 15%	0,01 -84%	0,24 14%	0,23 53%
II-N.4	175,55 21%	101,40 -1%	0,31 40%	0,16 80%	0,25 21%	0,15 -3%
II-N.5	180,84 25%	172,71 69%	0,29 32%	0,08 -16%	0,26 26%	0,25 69%
II-N.6	152,74 6%	138,79 35%	0,22 2%	0,05 -40%	0,22 5%	0,20 35%
II-N.7	146,10 1%	172,48 68%	0,23 6%	0,09 4%	0,21 1%	0,25 70%
II-N.8	165,78 15%	66,41 -35%	0,26 16%	0,16 76%	0,24 14%	0,10 -36%

Tablo 8’de II nolu proses ile oluşturulan dokulu kaplanmış yüzeylerin sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsayısı sonuçları, yüzeyi kaplanmış düz yüzeye sahip kalıp numunesinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Düz yüzeyin kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjisi 75,0 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayısı sırasıyla 0,12 ve 0,11 olarak hesaplanmıştır. Dokulu 8 numunenin de sürtünme enerjisi değeri kaplamalı düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Düz yüzeyin L1 yağlı sıvı sürtünme durumunda ise sürtünme enerjisi 73,0 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,10 ve 0,09 olarak hesaplanmıştır. Dokulu numunelerden I ve 8 numaralı numunelerin sürtünme enerjisi değeri düz yüzeye göre düşük çıkmıştır; en iyi sonuç ise 1 numaralı numune üzerinden elde edilmiştir. I numaralı numunenin sürtünme enerjisi %27 (53,94 N.mm) ve kinetik sürtünme katsayısı %14 (0,08) oranında azalmıştır. I nolu proses kaplamalı grubunda da açıklandığı üzere II nolu processte oluşturulan kaplamalı dokuların kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjilerinin yakın çıkması, yüzey enerjilerinin birbirlerine yakın olmasındandır. Şekil 6’da belirtildiği üzere II nolu prosesin 0,8 mm çap bilya ile yüzey örtme oranı, I nolu processe göre daha düşüktür. Aynı şekilde Tablo 9’da yer almen değerleri de alt limit olan 0,3 mm değerine çok yakındır. Sınırlarda olan bu iki özellik, yüzeyde doku yerine dağınmış pürüzlü bir yapı oluşturmuştur. Yukarıda da açıklandığı üzere kaplamanın rastgele dokulardaki etkisi ile birlikte

bu iki etken bir araya geldiğinde üç cisimli abrasif aşınma ortaya çıkarak sürtünme ve aşınmayı arttırmaktadır. Sıvı sürtünme durumunda düşük çıkan iki yüzey ise bahsedilen uygun şartların bir araya gelmesi durumunu göstermektedir.

Tablo 9’da belirtilen kalıp ve sac yüzeylerin test öncesi ve sonrası pürüzlülük değerleri incelendiğinde, pürüzlülük değerlerindeki artma ve azalma durumlarının sürtünme enerjisi değişimleri ile doğrudan bağlantısı olmadığı ve bilyalı dövme gibi rastgele açılan dokulara ilişkin kurulamayacağı değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin düşük olması kalıp üzerindeki dokuların tepeliklerinin yüksekliklerinin düşük olmasına yol açmakta; fakat tepeliklerin yüzey üzerindeki dağılımı, yoğunluğu ve konularının değişmesi ile ilgili bir sonuç içermemektedir. Ra değerlerinin düşük olması oluşan dokuların geometrilerinin değişmesine, daha sığ dokuların oluşmasına, aşınma ürünlerinin haznelere dolma eğiliminin yükselmesine, yüzeylerin birbirlerine adhezif olarak daha fazla çekmesine yol açması gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu şartlar altında sürtünme katsayısının yükselmesi söz konusu olabilmektedir [3].

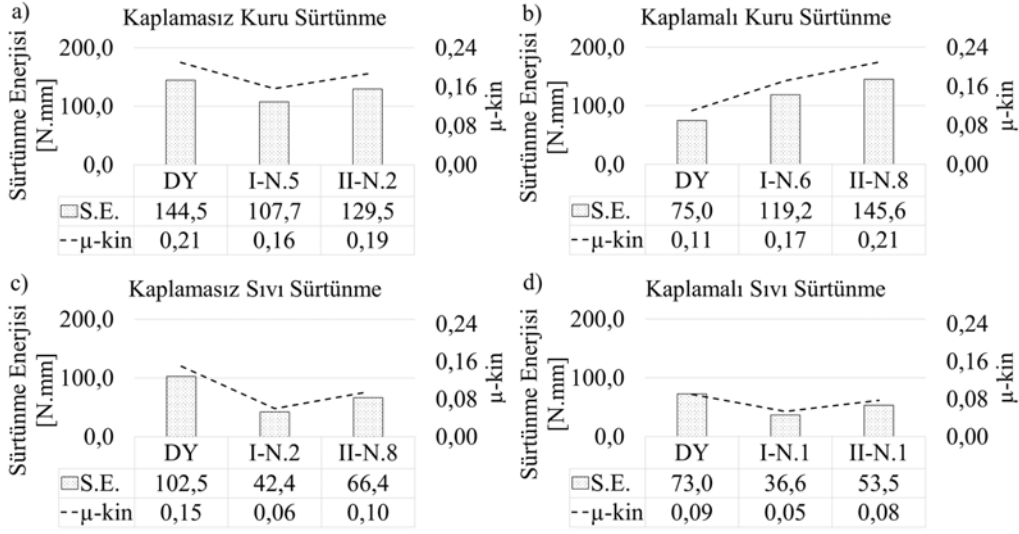
Şekil 9a, Şekil 9b, Şekil 9c ve Şekil 9d’de sırasıyla kaplamasız kuru sürtünme, kaplamalı kuru sürtünme, kaplamasız sıvı sürtünme ve

Tablo 8. II nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesinde oluşturulan kaplamalı dokuların sürtünme test sonuçları ve kaplamalı düz yüzey ile karşılaştırılması
(Coated textures, Industrial shot peening process II, friction test results and comparison with coated flat surface)

Yüzey Durumu	Sürtünme Enerjisi				Sürtünme Katsayısı _I (statik)		Sürtünme Katsayısı _I (kinetik)					
	[N.mm]				Birimsiz		Birimsiz					
	C1→Kuru		C1→L1		C1→Kuru		C1→L1					
<i>Kaplamalı Düz Yüzey (REF)</i>	75,00	%	73,00	%	0,12	%	0,10	%	0,11	%	0,09	%
	<i>değişim</i>		<i>değişim</i>		<i>değişim</i>		<i>değişim</i>		<i>değişim</i>		<i>değişim</i>	
II-N.1	159,28	112%	53,49	-27%	0,24	99%	0,10	5%	0,23	109%	0,08	-14%
II-N.2	153,03	104%	150,88	107%	0,21	75%	0,13	31%	0,22	102%	0,22	148%
II-N.3	158,75	112%	99,35	36%	0,25	110%	0,18	76%	0,23	108%	0,14	60%
II-N.4	150,85	101%	123,76	70%	0,25	105%	0,03	-66%	0,22	99%	0,18	101%
II-N.5	158,30	111%	158,21	117%	0,19	60%	0,03	-72%	0,23	109%	0,23	156%
II-N.6	149,52	99%	74,26	2%	0,25	109%	0,10	0%	0,22	97%	0,11	20%
II-N.7	163,20	118%	143,67	97%	0,24	104%	0,06	-40%	0,24	116%	0,21	134%
II-N.8	145,59	94%	55,65	-24%	0,25	106%	0,07	-30%	0,21	91%	0,08	-10%

Tablo 9. Numunelere ait kontak açısı, Almen yüksekliği ve test öncesi-sonrası yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları
(measurement results for contact angle, Almen height and before-after roughness)

Numune	Kontak Açısı [°]		Almen Yüksekliği [mm]	Ra-Kaplamasız Yüzey Pürüzlülük Ölçümü- μm				Ra-Kaplamalı Yüzey Pürüzlülük Ölçümü- μm			
	Kaplama			Test Öncesi		Test Sonrası		Test Öncesi		Test Sonrası	
	Kaplamasız	Kaplamalı		Kalıp	Sac	Kalıp	Sac	Kalıp	Sac	Kalıp	Sac
<i>Düz Yüzey</i>	71,850	60,000	-	1,059	1,063	1,132	1,116	0,068	1,409	0,084	1,191
I nolu Proses N.1	50,857	38,514	0,482	1,187	1,449	1,111	1,265	1,111	1,209	0,979	1,410
I nolu Proses N.2	48,223	37,675	0,463	0,923	1,271	0,938	1,365	1,026	1,292	1,008	1,440
I nolu Proses N.3	49,699	38,959	0,453	0,855	1,531	0,891	1,568	0,951	1,470	1,178	1,307
I nolu Proses N.4	46,845	39,416	0,549	1,222	1,443	1,186	1,604	1,196	1,236	1,296	0,932
I nolu Proses N.5	46,846	40,381	0,532	0,904	1,554	0,932	1,289	0,942	1,339	1,011	1,358
I nolu Proses N.6	49,480	41,432	0,627	1,076	1,524	1,263	1,694	1,257	1,216	1,110	1,418
I nolu Proses N.7	50,863	41,102	0,658	1,119	1,336	0,964	1,358	1,134	1,370	1,092	1,464
I nolu Proses N.8	49,480	36,886	0,636	1,001	1,505	1,048	1,742	1,156	1,639	0,941	1,303
II nolu Proses N.1	50,859	46,580	0,325	0,911	1,448	0,797	1,393	0,891	1,337	0,875	0,932
II nolu Proses N.2	50,858	45,111	0,384	1,188	1,228	1,013	1,383	1,077	1,247	1,223	1,180
II nolu Proses N.3	52,348	46,847	0,339	1,157	1,488	1,137	1,278	0,981	1,538	0,991	1,390
II nolu Proses N.4	52,354	43,777	0,410	0,936	1,456	1,120	1,512	1,146	1,570	0,962	1,493
II nolu Proses N.5	52,350	45,107	0,381	1,155	1,369	1,001	1,393	1,322	1,377	1,094	1,399
II nolu Proses N.6	50,854	46,843	0,342	1,204	1,440	1,272	1,678	1,165	1,306	1,074	0,998
II nolu Proses N.7	50,852	43,772	0,371	1,198	1,356	1,119	1,197	1,196	1,308	1,284	1,266
II nolu Proses N.8	50,863	45,111	0,391	0,955	1,374	1,068	1,396	1,341	1,494	1,320	1,463



Şekil 9. Düz yüzeye göre en iyi / en yakın değerlerin karşılaştırılması a) kaplamasız kuru yüzey b) kaplamalı kuru yüzey c) kaplamasız yağlı yüzey d) kaplamalı yağlı yüzey (Comparison best/closest values acc to flat surface a) uncoated dry surface, b) coated dry surface c) uncoated lubricated surface d) coated lubricated surface)

kaplamalı sıvı sürtünme test sonuçlarına göre en iyi değerlerin ve azalma olmayan gruptaki en yakın değerlerin sonuçları özet şeklinde gösterilmiştir. Tablo 9'da ise kontak açıları, I ve II nolu endüstriyel bilyalı dövme proseslerinde doku oluşturma sürecinde kullanılan Almen plakalarına ait Almen yükseklik değerleri ve kaplamasız ve kaplamalı durumların test öncesi ve sonrası Ra ortalama pürüzlülük değerleri yer almaktadır.

Bilyalı dövme ile yüzeye açılan dokular üzerine uygulanan CrN kaplama sürtünmeyi, sıvı sürtünme durumunda kısmen azaltsa da kuru sürtünme durumunda bütün yüzeylerde arttırmıştır. Burada PVD yöntemi ile kaplamanın uygun olmadığı çıkarımı yapmak doğru olmayabilir. CrN kaplama türünün özellikle kuru sürtünme durumunda 2-10 mikrometre yüksekliğinde olması nedeniyle, yüzeyin pürüzlülüğü, yüzeyde oluşan dokuların geometrisi ve boyutlarını etkilediği bilinmektedir. Yani sıra sac malzeme ile CrN kaplama arasındaki adhezyonun orijinal kalıp malzemesinden yüksek olması da bir diğer etken olabilir. Kalıp yüzeyindeki yüzey pürüzlükleri, CrN kaplandıktan sonra çok daha sert hale geldiği için karşı yüzey olan sac malzemesini daha abrazif bir karakteristikte çizmesi, sac malzemede aşınma ürünlerini arttırması, bu aşınma ürünlerinin üç cisimli abrazif aşınmaya dönüşmesi ve aşınma ürünlerinin dokuların içlerine sıvanarak dokuların işlevini düşürmesi gibi negatif etkilere neden olup sürtünme testleri sonucunda kaplamalı yüzeylerin sürtünmeyi arttırdığı değerlendirilmiştir.

4. Simgeler (Symbols)

A ₅	[%]	: Kopma Uzaması
E _s	[N]	: Sürtünme Enerjisi
F _s	[N]	: Sürtünme Kuvveti
F _N	[N]	: Normal Kuvvet
C	[-]	: Karbon
C1	[-]	: PVD Kaplamalı Grup
Cr	[-]	: Krom
CrN	[-]	: Krom Nitrür
G1	[-]	: Normal İşlenmiş Bilya
G2	[-]	: İki kez İşlenmiş Bilya
L1	[-]	: Yağlama Uygulanan Grup
Mn	[-]	: Mangan
Mo	[-]	: Molibden
P	[-]	: Fosfor

PVD	[-]	: Fiziksel Buhar Biriktirme
Ra	[-]	: Ortalama Pürüzlülük Değeri
Re	[N.mm ⁻²]	: Akma Mukavemeti
Rm	[N.mm ⁻²]	: Çekme Mukavemeti
S	[-]	: Kükürt
Si	[-]	: Silisyum
V	[-]	: Vanadyum

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, kalıp yüzeyine bilyalı dövme prosesi ile oluşturulan yüzey dokusunun derin çekme prosesi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Kuru sürtünme durumunda uygun şartlar oluştuğu zaman, dokulu yüzeylerin sürtünme enerjisinin ve kinetik sürtünme katsayısının düz yüzeylere göre % 15 - 25 aralığında azaldığı gözlemlenmiştir. Sac metalin şekillendirilmesi için gereken kuvvet ve enerji ihtiyacı da bu değerlerle orantılı olarak düşmesi anlamına gelecektir. Bu sonuç, küresel ölçekte sınırlı enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı açısından son derece dikkat çekicidir. Kuru sürtünme durumunda meydana gelen bu iyileşmenin yüzey dokularının gerçek temas alanını düşürmesinin bir sonucu olduğu değerlendirilmiştir. Farklı proseslerde oluşturulan farklı dokuların geometrileri, boyutları, kalıp yüzeyindeki yoğunluklarının sürtünme değerlerini etkilediği belirlenmiştir.
- Kuru sürtünme durumunda, CrN kaplamalı dokulu yüzeylerin sonuçları kaplamalı düz yüzey test sonuçlarına göre kıyaslandığında, sürtünme enerjisi ve kinetik sürtünme katsayısı beklendiğinin aksine yüksek çıkmıştır. Seçilen kaplama cinsinin ve kalınlıklarının etkili olduğu anlaşılmıştır. Sac ve kalıp arasındaki sertlik farkının artmasından dolayı, kalıp ve sac arasındaki oluşan sürtünme durumunun abrazif karakteristiğinin değiştiği, aşınma eğiliminin ve sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir.
- Sıvı sürtünme durumunda, dokulu yüzeyler düz yüzey test sonuçlarına göre kıyaslandığında, sürtünme enerjisinin % 6 – 59 aralığında ve kinetik sürtünme katsayısının %8 - 60 aralığında azaldığı gözlemlenmiştir. Oluşturulan dokuların sürdürülebilir hidrostatik yağlama oluşumunu sağladığı için sürtünme katsayısındaki azalma oranı fazladır.

- Sıvı sürtünme durumunda, CrN PVD kaplamalı dokulu yüzeylerin yağ kullanılmasına rağmen sürtünme enerjisini arttırabildiği belirlenmiştir. Bilyalı dövme ile yüzeye açılan dokular üzerine uygulanan CrN kaplama sürtünmeyi, sıvı sürtünme durumunda kısmen azaltsa da kuru sürtünme durumunda bütün yüzeylerde arttırmıştır. Burada CrN kaplama türü katmanlarının ve kalınlığının, yüzeyin pürüzlüğünü, yüzeyde oluşan dokuların geometrisini ve boyutlarını etkilemesinin sonuçları etkilediği değerlendirilmiştir. Yanı sıra sac malzeme ile CrN kaplama arasındaki adhezyonun orijinal kalıp malzemesinden yüksek olması da bir diğer etken olduğu, kalıp yüzeyindeki yüzey pürüzlükleri CrN kaplandıktan sonra çok daha sert hale geldiği için karşı yüzey olan sac malzemesini daha abradif bir karakteristikte çizmesi, sac malzemede aşınma ürünlerini arttırması, bu aşınma ürünlerinin üç cisimli abradif aşınmaya dönüşmesi ve aşınma ürünlerinin dokuların içlerine sıvanarak dokuların işlevini düşürmesi gibi negatif etkilere neden olup sürtünme testleri sonucunda kaplamalı yüzeylerin sürtünmeyi arttırdığı değerlendirilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Proje çalışmalarımız kapsamında, finansman desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Birimine (Proje No: FDK-2022-3002), Ulus Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş. Kurucusu ve Yönetim Kurulu Başkanı Ragıp Tunalılar Beye (Proje No:2021-02) ve bilyalı dövme prosesi için hizmet sağlayan PHI Metal (Rözmaş Çelik) çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

- Xu L., Zheng JH., Wu S., Wei XX., Wang JJ., Recent development on surface texturing for improving tribological properties, *Tool Eng*, 52 (4), 7–12, 2018.
- Hosford WF., Caddell RM., *Metal forming: mechanics and metallurgy*, Cambridge, UK, 2007.
- Chen K., Yang X., Zhang Y., Yang H., Lv G., Gao Y., Research progress of improving surface friction properties by surface texture technology, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 116 (9), 2797–2821, 2021.
- Altan T., Ngaile G., Shen G., *Cold and hot forming: fundamentals and applications*, Ohio, USA, 2005.
- Shum PW., Zhou ZF., Li KY., Investigation of the tribological properties of the different textured DLC coatings under reciprocating lubricated conditions, *Tribol. Int.*, 65, 259–264, 2013.
- Rosenkranz A., Costa HL., Baykara MZ., Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear – A review, *Tribol. Int.*, 155, 2021.
- Wang H., Tian L., Zheng J., Yang D., Zhang Z., The synergetic effects of laser texturing and super-hydrophobic coatings on improving wear properties of steel, *Tribol. Int.*, 173, 2022.
- Mao B., Siddaiah A., Liao Y., Menezes P.L., Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: a review, *J. Manuf. Processes*, 53, 153–173, 2020.
- Sun Q., Hu T., Fan H., Zhang Y., Hu L., Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500°C: influence of laser surface texturing, *Tribol. Int.*, 92, 136–145, 2015.
- Amanov A., Tsuboi R., Oe H., Sasaki S., The influence of bulges produced by laser surface texturing on the sliding friction and wear behavior, *Tribol. Int.*, 60, 216–223, 2013.
- Zhang Q., Mei T., Zhang D., Cao M., Han B., Preparation of chemically etched surface texture and its friction characteristics in sheet forming, *Procedia Manuf.*, 50, 439–443, 2020.
- Maldonado-Cortés D., Peña-Parás L., Barrios-Saldaña V., Cruz-Bañuelos JS., Adamiak M., Synergistic effect on the tribological properties of tool steel through the use of laser surface texturing channels and nanoparticles, *Wear*, 426–427, 1354–1361, 2019.
- Franzen M., Witulski J., Brosius A., Trompeter M., Textured surfaces for deep drawing tools by rolling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 50, 969–976, 2010.
- Vrbka M., Krupka I., Svoboda B., Sperka P., Effect of shot peening on rolling contact fatigue and lubricant film thickness within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts, *Tribol. Int.*, 44, 1726–1735, 2011.
- Nakano M., Korenaga A., Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions, *Tribol. Lett.*, 28, 131–137, 2007.
- Balyalı HA., Experimental investigation of tribological behaviour of metallic materials after shot peening implementation, MSc Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul, 2015.
- Gül C., Albayrak S., Çinici H., The effects of alkali, alkali-acid and sandblasting surface treatments applied before Tantalum-Oxide coating with magnetron sputtering on the wear behavior of 7075 Aluminum alloys, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 795–806, 2023.
- Bai L., Meng Y., Khan ZA., Zhang V., The synergetic effects of surface texturing and MoDDP additive applied to ball-on-disk friction subject to both flooded and starved lubrication conditions, *Tribol. Lett.*, 65, 2017.
- Gachot C., Rosenkranz A., Hsu SM., Costa HL., A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement, *Wear*, 372–373, 21–41, 2017.
- Erdemir, Flat product catalog 2021. https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2021_-_TR-4874.pdf. Yayın tarihi Ocak 1, 2021. Erişim tarihi Mart 9, 2023.
- Korkmaz Çelik, 1.2379 Genel Özellikleri. https://www.korkmazcelik.com/1_2379. Yayın tarihi Temmuz 1, 2020. Erişim tarihi Mart 9, 2023.
- Olguner S., Bozdana A., Ultrasonically assisted deep drawing process: Two-stage finite element analysis and experimental verification, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 257–268, 2023.
- Toparlı M., Fatigue performance of tungsten carbide cobalt (WC-Co) hardmetal materials after shot peening process, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 269–281, 2023.
- Avcu Y., Investigation of tribological behavior of Ti6Al4V alloy after shot peened, PhD Thesis, Kocaeli University, Institute of Science and Technology, Kocaeli, 2019.
- Özbeş M., Gürbüz M., Karakurt U., Experimental investigation of the effects of hydrophobic impeller surface on the centrifugal pump performance, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 267–274, 2020.
- Azushima A., *Tribological technology in sheet metal forming*, Springer-Materials Forming, Machining and Tribology, eBook, 2022.
- Zhengfeng C., Yanqiu X., Chuan C., A Synergetic strategy based on laser surface texturing and lubricating grease for improving the tribological and electrical properties of Ag coating under current-carrying friction, *Friction*, 9, 978–989, 2021.
- Xing Y., Deng J., Gao P., Angle-dependent tribological properties of AlCrN coatings with microtextures induced by nanosecond laser under dry friction, *Appl. Phys. A*, 124, 2018.

