TURKISH JOURNAL OF
ENGINEERING & ENVIRONMENTAL SCIENCES
TÜRK MÜHENDİSLİK VE ÇEVRE BİLİMLERİ DERGİSİ

VOLUME 22 NUMBER 2 1998
CİLT SAYI

Published by
the Scientific and Technical Research Council of Turkey

TURKISH JOURNAL OF
ENGINEERING & ENVIRONMENTAL SCIENCES
TÜRK MÜHENDİSLİK VE ÇEVRE BİLİMLERİ DERGİSİ

CONTENTS
İÇİNDEKİLER

Bir Robot Tutucusu Tarafından Yakalanmış Paralel Yüzlü İş Parçalarının Kararlılığı ve Hareketi 55
Stability and Behaviour of Parallel-Sided Workpieces Held by a Robot Gripper
E. TAÇGIN

Kuru Sürtünme Şartlarında Pim-Ring Kayma Sistemi İçin Plastik Deformasyon Isısının Teorik ve Deneysel Analizi 65
Theoretical and Experimental Analys of Plastic Deformation Heat For Pim-Ring Sliding System Under Dry Friction Conditions
D. ODABAŞ, M. B. KARAMIŞ

Geçiş Borularında Eksene Dik Kesitlerdeki Ortalama Hızın Değişimi 77
Variation of Average Velocity Through the Transition Pipes at Cross Sections Perpendicular to the Axis
M. ATILGAN, M. GÖLCÜ

İşlenmiş Parça Boyutlarının İncelenmesinde İstatistiksel Modelleme Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi 87
Evaluation of Statistical Modeling Techniques in the Investigation of the Dimensions of Machined Components
C. ÇOĞUN, B. KILINÇ

Hava Jetleri Girişimi Probleminin Düşük Reynolds Sayılarında Çözümü İçin Sayısal Bir Yöntem 101
The Numerical Solution of Interacting Air Jets Problem for Low Reynolds Numbers
H. EREN, Ö. E. PEREMECİ, V. TANYILDIZI

Bir Öğrenme Algoritması Üzerine İnceleme 109
A Study on a Learning Algorithm
N. A. HIZAL

Sıvı Kristal Yöntemiyle İki Silindir Arasındaki Akımda Isı Geçişinin İncelenmesi 117
Study of Heat Transfer in Concentric Annulus Flow by Liquid-Crystal Technique
K. KUVVET, T. YAVUZ

Hidrolik Konum Kontrol Sistemlerinin Gerçeğe Yakın Benzetimi 125
The Realistic Model and Simulation of Hydraulic Position Control Systems
M. R. BECAN, A. KUZUCU, K. KUTLU

Gözenekli Seramiklerde Işınım Yayma Sayısının Ölçümü 131
Measurement of Emissivity of Porous Ceramic Materials
O. BÜYÜKALACA

İkili Metal Karışımlarından Krom (VI), Demir (III) ve Bakır (II) İyonlarının R. arrhizus *and* C. vulgaris*'e Yarışmalı Biyosorbsiyonu* 145
Competitive Biosorption of Chromium (VI), Iron (III) and Copper (II) Ions From Binary Metal Mixtures By *R. arrhizus* and *C. vulgaris*
Y. SAĞ, Ü. AÇIKEL, Z. AKSU, T. KUTSAL

Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences
22 (1998) 65-76
© TÜBİTAK

Kuru Sürtünme Şartlarında Pim-Ring Kayma Sistemi İçin Plastik Deformasyon Isısının Teorik ve Deneysel Analizi

Durmuş ODABAŞ, M.Baki KARAMIŞ
Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri-TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 18.09.1996

Özet: Bu çalışmada kaymalı sürtünme yapan malzemelerin aşınan yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyon ısısının hesaplanmasını sağlayan teorik bir model geliştirildi ve teorik modelin geçerliliği araştırıldı. Aşınma deneyleri pim-ring kayma sisteminde değişik yük ve kayma hızı şartları altında yapıldı. Deneyler esnasında sürtünme elemanlarının değişik noktalarından hacim sıcaklığı ve sürtünme katsayısı değerleri ölçüldü. Bu değerler kullanılarak yaklaşık toplam sürtünme ısısı hesaplandı.

Toplam sürtünme ısısı değerleriyle, teorik olarak hesaplanan plastik deformasyon ısısı değerleri birbiriyle mukayese edilerek, plastik deformasyon ısısı için kurulan teorinin yaklaşık geçerli olduğu anlaşıldı. Toplam sürtünme ısısının en büyük kısmının plastik deformasyondan ileri geldiği ve plastik olarak deforme olan tabaka kalınlığının yük ve hızın artışıyla arttığı tespit edildi. Deformasyon kalınlığını artıran en önemli faktörün temas yüzeyi sıcaklığı olduğu anlaşıldı.

Anahtar Sözcükler: Kayma sürtünmesi, Plastik Deformasyon, Sürtünme Isısı.

Theoretical And Experimental Analys Of Plastic Deformation Heat For Pim-Ring Sliding System Under Dry Friction Conditions

Abstract: In this study, a theoretical model which can ensure the calculation of plastic deformation heat occured at the worn surfaces due to the friction during sliding was established and the validity of the theoretical model was investigated. Wear tests were carried out with pin-on ring system under different speed and load conditions. During the tests, the coefficient of friction and the bulk temperaures at the different places of friction pairs were measured. The total frictional heat was calculated approximately by using these values.

By comparing the total heat results with the theoretical results of the plastic deformation heat, it has been understood that the mathematical model established to calculate the plastic deformation heat approximately is valid. It has been indicated that the most of the total frictional heat is dissipated by plastic deformation, and the thickness of the plastically deformed layer increases with increasing load and speed. It was found that the most important factor which increases the deformation thickness is the contact surface temperature.

Key Words: Sliding Friction, Plastic Deformation, Frictional Heat.

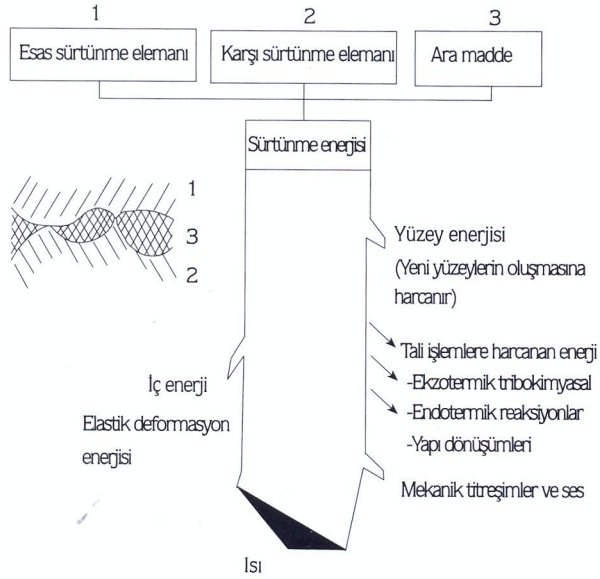
Giriş

Malzemelerin kayma aşınması karakteristiği yük, hız ve bunlara bağlı olarak meydana gelen termal şartların tribolojik sistemi oluşturan elemanlar üzerindeki bileşik etkisine bağlıdır. Tribolojik sistemler çevresi ile enerji ve kütle alışverişinde bulundukları için termodinamik bakımdan açık sistem olarak kabul edilirler. [Czichos, 1977; Rymuza, 1996]. Tribolojik sisteme giren ve çıkan enerjiler arasındaki farka genel olarak "Enerji kaybı veya sürtünme enerjisi" adı verilmektedir [Uetz, Föhl, 1978; Rigney, Hirth, 1979]. Bir tribolojik sistemde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylara ait enerji dağılımı Şekil 1'de görülmektedir. Bu şekilden yaklaşık bir tahminle, sürtünme enerjisinin % 75-80'inin ısı enerjisine, % 4-5'inin kırılma enerjisine, % 4-5'inin mekanik titreşim ve ses enerjisine, % 7-8'inin iç enerji ve % 4-5'inin ise tribo-kimyasal reaksiyonlara, yapı dönüşümlerine, artık gerilmelere ve diğer bir takım tribolojik olaylara dönüştüğü anlaşılır. Sürtünme ısısı sürtünen elemanların temas yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana getirerek malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini olumsuz yönde etkiler [Quinn, 1996].

Metallerde sürtünme ısısının ana kaynağını oluşturan muhtemel mekanizmaları üçü ana gruba ayırmak mümkündür [Rigney, Hirth, 1979]:

(1) Temas yüzeyinde meydana gelen deformasyonlar: Sürtünme çiftlerinin temas yüzeyindeki pürüzler elastik veya plastik şekil değiştirerek aşınan yüzeylerde sürtünme ısısı meydana getirirler. Plastik deformasyon esnasında yapılan iş geri dönmeyen bir ısı enerjisine dönüşerek açığa çıkar. Elastik deformasyon işi ise sistemde birikerek tekrar geri alınır.

Şekil 1. Sürtünme enerjisinin dağılımı [Uetz, Fölh, 1978]

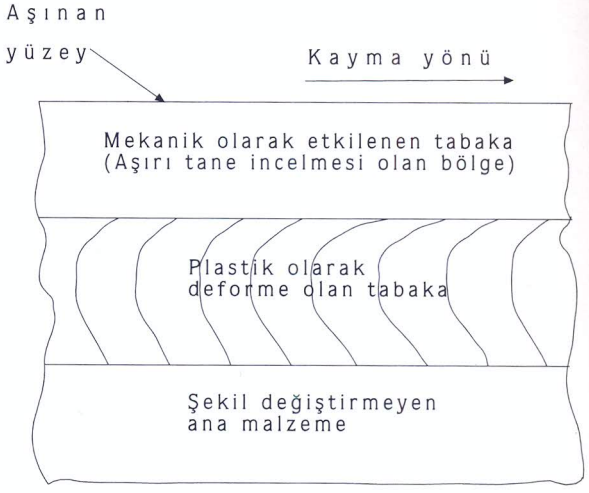


(2) Yüzeyaltında oluşan dislokasyonlar: Sürtünme esnasında yüzey ve yüzeyaltında meydana gelen dislokasyon hareketlerinin de büyük bir ısı kaynağı olduğu ve sürtünme ısısına büyük bir katkıda bulunduğu tespit edilmiştir [Nabarro, 1967, Kuhlmann-Wilsdorf, 1996]. Burada şekil değişimi esnasında ortaya çıkan enerji bölgesel ısınma ve soğuma etkisi yaparak termoelastik etki meydana getirir [Burton, 1980].

(3) Gerilmeli faz dönüşümleri: Sürtünme esnasında meydana gelen diğer bir enerji kaynağının da martenzit, ikiz teşekkülü vs. gibi mikroyapıda gerilme veya sertlik artışına neden olan faz dönüşümleri ve ayrıca bu esnada bir miktar da atom diffüzyonu olduğu anlaşılmıştır [Hirth and Lothe, 1968].

Birçok araştırmacı tarafından yapılan metallografik incelemelerde sürtünen malzemelerin aşınan yüzeylerine yakın bölgelerinde plastik deformasyon olduğu açıkca gözlenmiştir [Rigney, Glaeser 1979; Vingsbo, Hogmark, 1981; Kennedy, 1984; Şahin, Murphy, 1996]. Aşınan malzeme yüzeyine dik alınan kesitler optik veya elektron mikroskopları ile incelenerek, yüzeyden itibaren üç farklı bölge olduğunu tespit edilmiştir (Şekil 2):

Şekil 2. Sürtünme esnasında aşınan yüzeyde meydana gelen yapı değişikliği [Rigney, Hirth, 1979].



(1) Mekanik olarak etkilenen bölge: Bu bölge aşınan yüzeyin hemen altında çok aşırı tane incelemesinin olduğu ve kalınlığı az bir tabakadır. Sürekli kayma sürtünmesi yapan sistemlerde plastik olarak deforme olan bu bölgenin tabaka kalınlığının belli bir sürtünme süresinden sonra sabit kaldığı tespit edilmiştir [Rigney, Glaeser, 1979]. Aynı zamanda bu bölgeye "mikronize olmuş tabaka" adı da verilmektedir [Tsuya, 1976].

(2) Plastik olarak deforme olan bölge: Mekanik olarak etkilenen tabakanın altında yer alan bu bölgede malzeme kayma ve ikiz teşekkülü ile plastik olarak şekil değiştirerek taneler kayma yönüne paralel olarak uzanır. Tane boyutu da bir miktar azalır. Fakat bu tabakanın kalınlığı uygulanan yük ve kayma hızı değerlerine göre değişir.

(3) Orijinal çekirdek yapı: En altta bulunan ve plastik deformasyondan etkilenmeyen esas malzeme bölgesidir.

Yukardaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere sürtünme ısısının en büyük kaynağını plastik deformasyon ısısı oluşturmaktadır. Protasov ve Kragelski [1982]. yaptıkları bir araştırmada kuru sürtünmede meydana gelen sürtünme ısısının % 85'lik kısmının plastik deformasyonla meydana geldiğini tespit ettiler. Gerek yüzey ve gerekse yüzeyaltı bölgesinde meydana gelen plastik deformasyon ısısı sürtünen elemanlara iletimle yayılır. Bununla beraber bir tribolojik sisteme giren ve çıkan enerjiler arasında termodinamik bakımından bir denge-

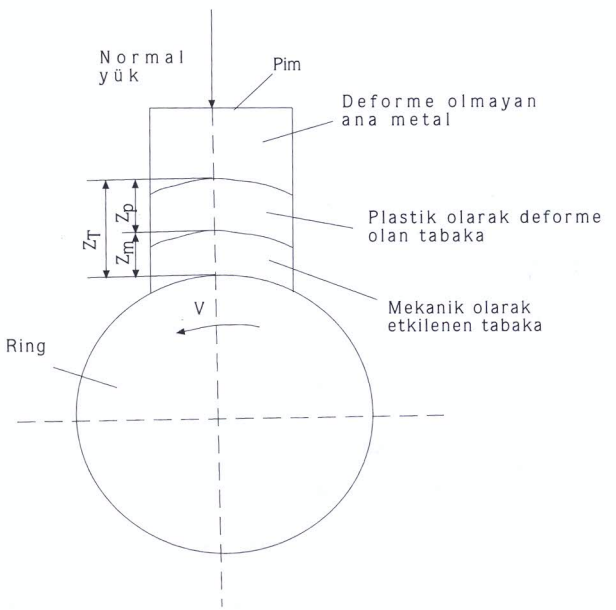
nin olup olmadığını tespit etmek çok zordur. Bunun başlıca sebebi aşınan yüzeylerde mazleme özelliklerinin değişmesi ve enerji kayıplarının kesin olarak tespit edilememesidir. Bu konuda bazı araştırmacılar özel şartlar için sürtünme ısısı dağılımıyla ilgili analitik çözümler yapmışlardır [Parakevas, Dimaroganas, 1972; Kar, Bahadur, 1981; Yevtushenko ve arkadaşları, 1993; Yevtushenko, Ukhansko, 1996;].

Bu çalışmanın gayesi pim-ring kayma sistemi için aşınan yüzeylerde oluşan toplam sürtünme ısısı (Q_T)'nin ana kaynağı olan plastik deformasyon ısısı (Q_p)'ı yeni bir teorik yaklaşım ile hasaplamak ve bunun doğruluğunu deneysel olarak araştırmaktır.

Teorik Yaklaşım ile Plastik Deformasyon Isısının Hesabı

Esas sürtünme elemanının yumuşak, karşı sürtünme elemanının ise sert olduğu kabul edilen bir pim-ring kayma sisteminde plastik deformasyonun yumuşak elemanın aşınan yüzeyinde ve bu yüzeyin hemen alt bölgesinde meydana geldiği bilinen bir gerçektir. Şekil 3'de bu çalışma için kabul edilen pim-ring sistemine ait plastik deformasyon modeli görülmektedir. Bu modele göre daha sert olması nedeniyle karşı sürtünme elemanının yani ringin hiç bir plastik deformasyona uğramadığı, plastik deformasyonun tamamının pimde olduğu kabul edilmiştir. Plastik deformasyonun oluşmasında şekil değiştirme sertleşmesi (yani pekleşme), mikro yapının yeniden kendine gelmesi ve tane küçülmesi gibi üç önemli mekanizma rol oynamıştır. Şekil 3'den de görüldüğü gibi, pim numunenin aşınan yüzeyi deformasyon bakımından üç tabakaya ayrılmaktadır [Odabaş, 1991]. Yüzeyin hemen altında yer alan ve aşırı incelmiş tanelerden meydana gelen en üstteki tabakanın yani "mekanik olarak etkilenen tabaka" nın kalınlığı ΔZ_m ile gösterilmiştir. Bu çalışmada sürekli rejim ve kararlı sürtünme şartlarında mekanik olarak etkilenen tabaka kalınlığının sabit bir değerde kaldığı kabul edilmiş olup, plastik deformasyon ısısının teorik hesabında bu tabaka kalınlığı esas alınmıştır. Çünkü sürekli kayma şartlarında malzeme en fazla bu bölgeden mekanik olarak zorlanmakta ve özellik değişimine uğramaktadır.

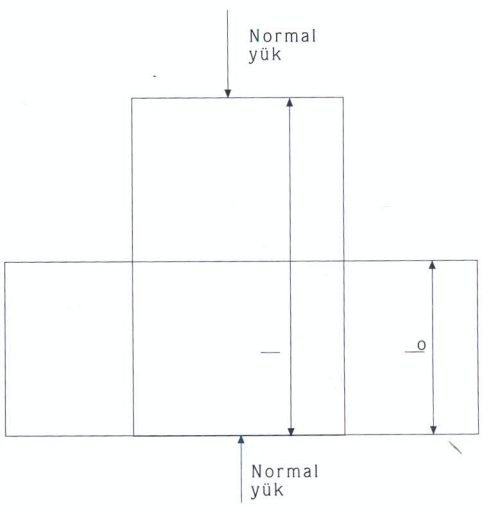
Şekil 3. Pim-Ring sistemi için kabul edilen plastik deformasyon modeli.



Bilindiği gibi basınç altında herhangi bir şekil değiştirme işlemi uygulanan bir metal elemanda meydana gelen şekil değişim miktarı, bu elemanın şekil değiştirmeden önceki lo (m) ve sonraki I (m) boylarına bağlı olarak tanımlanır [Çapan, 1984]. Şekil 4'de görülen basma şekil değişimi $\varepsilon=(l-l_o)/l_o$ olarak hesaplanır. Gerçek plastik şekil değişimi ise $\varepsilon_g=\ln(l_o/l)$ olarak ifade edilmektedir [Onaran, 1991]. Aynı şekilde pim malzemesinin aşınma yüzeyinde meydana gelen gerçek plastik şekil değiştirme miktarını, malzeme içinde alınan bir kristal tanesinin, deformasyondan önceki h_o (μm) ve sonraki h (μm) tane yüksekliğinde meydana gelen değişiklikten faydalanarak $\varepsilon_g=\ln(h_o/h)$ şeklinde hesaplamak mümkündür (Şekil 5).

Mekanik olarak etkilenen ΔZ_m (μm) kalınlığındaki bölgede mikroyapıya ait orijinal tanelerin deformasyondan önceki ortalama yüksekliği h_o (μm) iken, sürtünme esnasında basınç kuvvetinin etkisiyle tanede kayma yö-

Şekil 4. Basınç etkisindeki bir metal elemanda meydana gelen şekil değişimi.



nüne paralel bir uzama meydana gelir ve yüksekliği azalarak h olur. Buna göre herhangi bir aşınma şartı için pimin aşınan yüzeyinin mekanik olarak etkilenen hacim içinde plastik deformasyon için harcanan iş;

$$W_p = Vk_f.Ln(h_o/h) \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada malzemenin akma mukavemeti k_f yerine ortalama hacim sertliği Hv konursa, (1) eşitliği

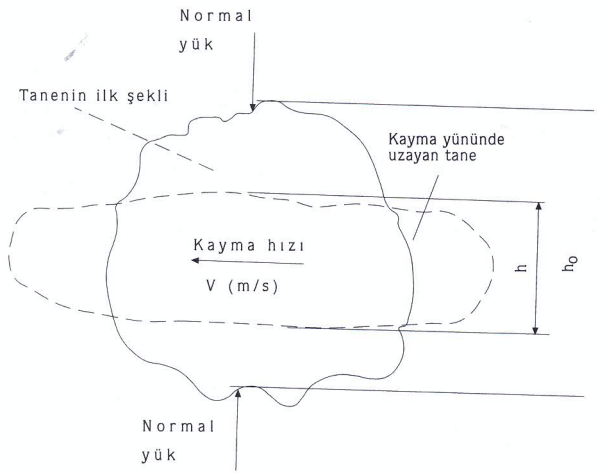
$$W_p = VHv.\ In(h_o/h) \quad (2)$$

şeklini alır. Plastik olarak deformasyona uğrayan malzeme hacmi V, Şekil 5'den

$$V = \Delta Z_m.L.d_1 \quad (3)$$

olarak hesaplanır. Burada L toplam kayma yolu, d_1 ise temas yüzeyinin kayma doğrultusuna dik genişliği yani pim numunenin çapıdır. Mekanik olarak etkilenen tabaka kalınlığı ΔZ_m temas yüzeyinden itibaren ince taneli bölgenin kalın taneli bölgeye geçiş sınırına kadar alınır. Bu tabaka kalınlığı mikrosertlik taraması ile veya optik mikroskopla gözleyerek yaklaşık olarak tespit edilebilir.

Şekil 5. Sürtünme esnasında, aşınan yüzeyin altındaki bölgede bir kristal tanesinin plastik deformasyonu ve yüksekliğindeki değişim.



Teorik ifadenin kurulmasında yapılan kabullerden ve ihmal edilen bazı faktörlerden dolayı meydana gelecek hataları telafi eden bir Co düzeltme faktörü kulanılarak, (2) ve (3) eşitliklerinden elde edilen plastik deformasyon işine ait son ifade

$$W_p = Co\Delta Z_m\ Ld_1HvLn(h_o/h) \quad (4)$$

şeklini alır. Bu son ifade toplam deney süresi t'ye bölünürse plastik deformasyon esnasında açığa çıkan ısı miktarı

$$Q_p = Co\Delta Z_m\ v\ d_1HvLn(h_o/h) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada v=L/t ile hesaplanan kayma hızını göstermektedir. Düzeltme faktörünün C_o=1-3 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

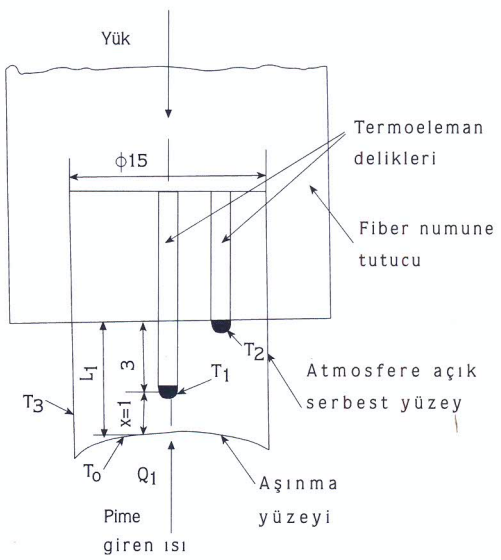
Bir sürtünme-aşınma olayında en büyük şekil değişimi temas yüzeyindeki tanelerde meydana gelir. Bu sebeple bir kayma periyodu içinde meydana gelen gerçek plastik şekil değişim miktarını ε_g = In (h_o/h) ifadesini kullanarak temas yüzeyine en yakın taneler üzerinde hesaplamak gerekir. Fakat deney esnasında bu değişimi tespit etmek çok zordur. Bunun yerine deney sonunda pimin aşınan yüzeyine dik, fakat kayma doğrultusuna paralel kesiti optik veya elektron mikroskop ile gözlenerek, mekanik olarak deforme olan tabakanın kalınlığının ölçülmesi ve bu bölgedeki ortalama tane yüksekliği h'ı tespit etmek daha kolaydır. Aynı şekilde deformasyondan önceki tane yüksekliği h_o ortalama tane boyutu olarak metallografik inceleme ile belirlenir.

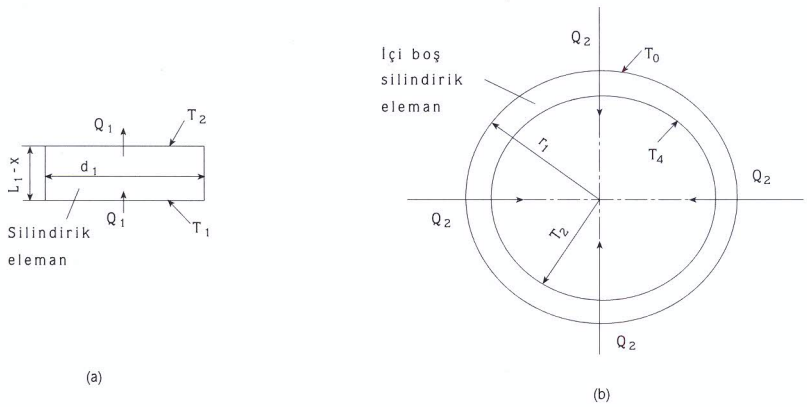
Bu çalışmada pim-ring sisteminde pimin ring üzerinde dairesel kesitli bir kanat olduğu ve ısı transferinin pim ekseni ve ringin de radyal doğrultusunda tek boyutlu olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir [Saka ve arkadaşları, 1977; Odabaş, 1991]. Şekil 6 ve 7'de pim ve ring elemanlarına ait ısı transfer modelleri görülmektedir. Sürekli rejim şartlarında pim-ring sisteminde oluşan toplam sürtünme ısısı

$$Q_T = Q_P + Q_S = Q_1 + Q_2 \quad (6)$$

şeklinde bir toplama eşit olur. Pimin aşınma yüzeyinde açığa çıkan ısı miktarı yaygın olarak bilinen $Q_S=\mu_k F_N v$ eşitliği ile hesaplanır ve bu ısı daha çok aşınma taneciklerinin oluşması esnasında açığa çıkar [Rosenfield, 1990]. Bu bağıntı ile hesaplanan sürtünme ısısı plastik

Şekil 6. Pim numunenin ısı transfer modeli ve sıcaklık ölçme noktaları.





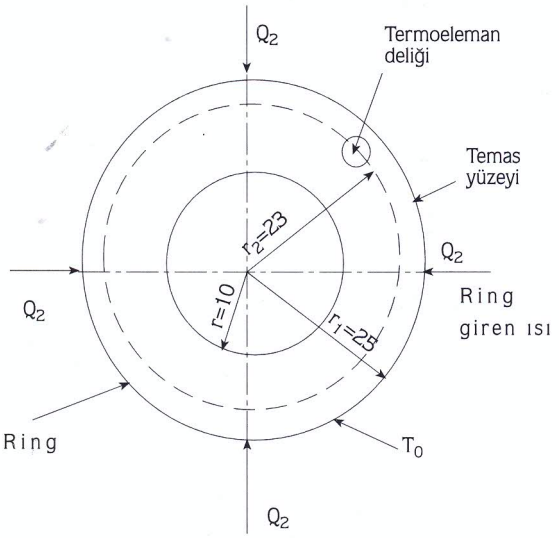
Şekil 8. (a) Pimdeki tek boyutlu ısı iletimini temsil eden silindirik eleman.
(b) Ringte radyal pöndeki ısı iletimini gösteren içi boş silindirik eleman.

deformasyon ısısının yanında çok küçük olduğu için ihmal edilbilir. Böylece toplam sürtünme ısısı yaklaşık olarak

$$Q_T = Q_P = Q_1 + Q_2 \qquad (7)$$

eşitliğine göre yaklaşık olarak plastik deformasyon ısısına eşit olur.

Şekil 7. Ringin ısı transfer modeli.



Şekil 8a'da görüldüğü gibi, yüksekliği (L_1-x) ve çapı d1 olan silindirik elemanda eksenel yönde tek boyutlu ısı iletimi olduğu kabul edilerek pim numuneye iletimle giren ısı miktarı

$$Q_1 = \lambda_1 A_1 \ (T_1 - T_2) \ / \ (L_1 - x) \qquad (8)$$

eşitliği ile hesaplanabilir [Kakaç. 1982]. Burada çevreye tabii konveksiyonla olan ısı kayıbı çok az olduğu için ihmal edilmiştir. Aynı şekilde, Şekil 8b'de görülen ve kalınlığı (r_1-r_2) olan içi boş silindirik elemanda sadece radyal yönde ısı iletildiği kabul edilerek, ringe giren ısı miktarı da

$$Q_2 = 2\pi \ \lambda_2 \ b \ (T_0 - T_4) \ / \ Ln(r_1/r_2) \qquad (9)$$

olarak hesaplanabilir [Kakaç, 1982]. Bu bağıntının çıkarılmasında da ringin dış yüzeyinden zorlanmış konveksiyonla atılan ısı ihmal edilmiştir.

Temas yüzeyinin ortalama sıcaklığının hesabında Şekil 6'da verilen analitik model kullanılmış ve ortalama sıcaklık

$$T_0 = [T_1 Sinh(mL_1) - T_2 Sinh(mx)] \ / \ [Sinh[m(L_1 - x] \qquad (10)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir [Odabaş ve arkadaşları 1995]. Burada (m) değeri $m = \alpha_1 P_1 / (\lambda_1 A_1)$ eşitliği ile hesaplanır. λ_1(29 W/m°K) pim malzemesinin ısı iletim katsayısı, A_1($179x10^{-6} m^2$) pimin kesit alanı, L_1 (4 mm) pimin atmosfere açık kalan uzunluğu, x (1 mm) T_1 sıcaklığının ölçüldüğü noktanın temas yüzeyine uzaklığı, b (16 mm) ringin genişliği, λ_2 (29 W/m°K) ise ring malzemesinin ısı iletim katsayısıdır. Pimin serbest yüzeyinde tabii konveksiyonla meydana gelen ısı transferinin ısı iletim katsayısı $\alpha_1 = 1.22 \ (T_3 - T_ç)/d_1$ ile hesaplanır.

Deney Metodu

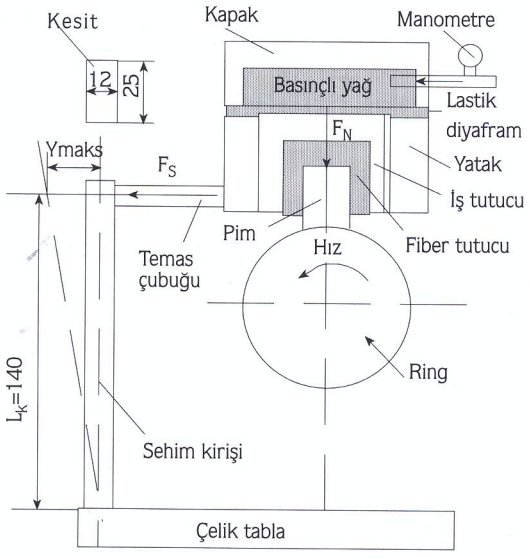
Sürtünme deneyleri kuru şartlarda ve oda sıcaklığında ($T_ç$ = 30°C) bir pim-ring sisteminde gerçekleştirildi. Deney tesisatı ile ilgili ayrıntılı bilgiler kaynak [Odabaş, 1991] ve [Odabaş ve Karamış, 1993]'de verilmiştir. Test malzemesi olarak AISI 3315 çeliği, karşı sürtünme elemanı olarak da AISI 3150 sıcak is takım çeliği kullanılmıştır. AISI 3315 çeliğinin kimyasal analizi; % 0.15 C, % 0.17Mn, % 0.21 Si, % 0.8 Cr ve % 3.5 Ni, AISI 3150 çeliğinin kimyasal analizi ise; % 0.48 C, % 0.85 Mn, % 0.85 Cr ve % 1.25 Ni olarak tespit edilmiştir. AISI 3315 çeliğine sadece normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış olup sertliği 260 Hv olarak

sağlanmıştır. AISI 3150 çeliği ise normalleştirmeden sonra yağda sertleştirilerek sertliği 750 Hv olmuştur.

Sürtünme-aşınma deneyleri 1 m/s'lik hız ve 30-300 N'luk yük şartlarında ve ayrıca 30 N'luk yük ve 0.26-4 m/s'lik kayma hızı şartlarında olmak üzere iki safhada yapılmıştır. Deney süresi 25 dakika olarak uygulanmış. Herbir deney şartı için üçer deney yapılarak ortalama değerleri alınmıştır.

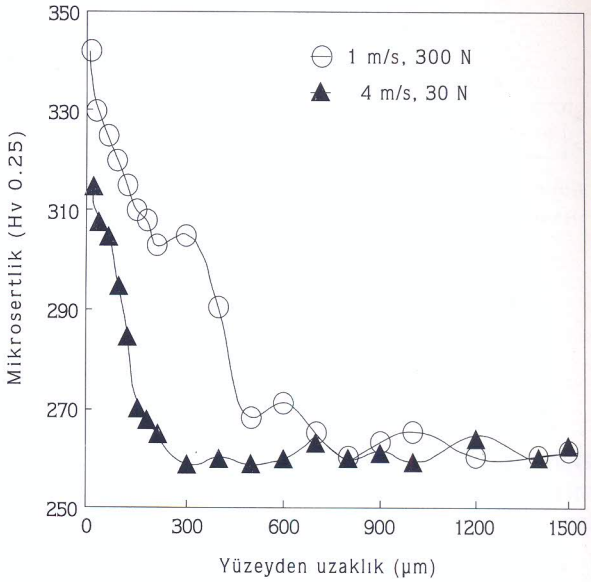
Pim numuneye nomal F_N[N] yükü, bir hidrolik pompa yardımıyla iç tutucunun üstünde bulunan hazneye gönderilen basınçlı yağın lastik diyaframı şişirmesi ve tutucuyu kaymalı yatağı içinde itmesi şeklinde uygulanmıştır (Şekil 9). Lastik diyafram ile iç tutucu arasındaki temas çapı d_h= 25 mm'dir. Temas alanı $A_h = \pi d_h^2/4$ ile hesaplanarak, normal yük $F_N = P_h.A_h$ olarak belirlendi. Burada P_h manometreden okunan yağ basıncıdır.

Şekil 9. Pim-ring sürtünme sisteminin şematik görünüşü.



Sürtünme katsayısının ölçülmesinde bir ucu ankastre, diğer ucu serbest olan dikdörtgen kesitli çelik bir kirişin elastik sınır içindeki sehiminden faydalanılmıştır. (Şekil 9). Sehim miktarı Y_{maks} bir deplasman transduseri ile ölçülmüştür. Sürtünme kuvveti $F_S = (3Y_{maks}EI)/L_k^2$ eşitliği yardımıyla hesaplandı [Pakdemirli ve arkadaşları, 1973]. Kinetik sürtünme katsayısı değerleri ise $\mu_k = F_S/F_N$ ifadesinden bulunmuştur. Burada E (çelik için $21x10^{10}$ N/m^2) kiriş malzemesinin elastiklik modülü ve I (= 25.(12)^4/12 mm^4) ise atalet momentidir.

Şekil 10. Mikrosertliğin aşınan yüzeyden itibaren değişimi.



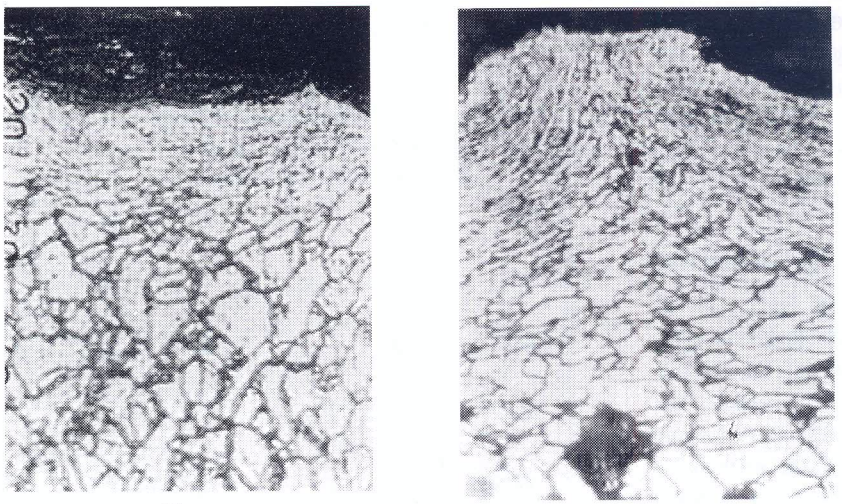
Deneyler esnasında [K] tipi Ni-CrNi termoelemanları kullanılarak, sürekli rejim şartları için pimin T_1, T_2 ve T_3 sıcaklıkları, ringin ise T_4 sıcaklığı ile kinetik sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüştür. Şekil 6'da verilen analitik ısı transfer modelinde sıcaklık ölçme noktaları görülmektedir. Ölçülen bu sıcaklık değerleri kullanılarak pim-ring sisteminin temas yüzeyi sıcaklığı teorik olarak (10) denklemi ile hesaplanmıştır.

Tane boyutundaki değişimleri tespit etmek için, deneylerden sonra pim numunelerinin aşınan yüzeylerine dik, fakat kayma yönüne paralel kesitleri % 2 nital + % 3 derişik HNO_3 karışımıyla dağlandıktan sonra optik mikroskop vasıtasıyla incelenmiştir. İnceleme sonunda mekanik olarak etkilenen tabaka içinde ortalama tane yüksekliği h; 30 N'luk yük ve 0.26-4 m/s hız şartları için 2 μm, 1 m/s ve 30-300 N'luk yük şartları için ise 1 μm olarak tespit edilmiş olup bu değerlerin tüm deney şartları için sabit kaldığı anlaşılmıştır. Orijinal tane boyutu h_o = 8 μm olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçülen ve hesaplanan değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Mikroyapı

Şekil 10'da aşınan yüzeyin altındaki kesitte mikrosertlik dağılımı görülmektedir. Plastik olarak deforme olan bölgenin sertliği artmıştır. Aşınan yüzeye en yakın bölgede sertlik maksimum olmuştur. Test malzemesi düşük karbonlu AISI 3315 (% 0.15 C) bir sementasyon çeliği olduğundan, sürtünme ısısından dolayı martenzit oluşma miktarı ihmal edilebilecek kadar azdır. Çünkü bu malzemenin test malzemesi olarak seçilmesi-



(a) (b)

Şekil 11ab. Aşınan yüzeylere dik olan kesitlerde optik mikroskopla alınan mikroyapılar (Büyütmex400). (a) Hız: 1 m/s, yük: 95 N (b) Hız: 1 m/s yük: 250 N

nin nedeni martenzit teşekkülüne imkan vermemesi ve böylece sadece plastik deformasyon sertleşmesini görebilmek içindir. Fakat ısının da etkisiyle tane sınırlarında yer yer karbür çökelmeleri meydana gelmiştir. Yüzeyaltında ulaşılan mikrosertlik değerlerinin 250-320 Hv arasında olması yapının ferrit + perlit gibi iki fazdan meydana geldiğini gösterir. Çünkü bu fazların sertliği bu değerler civarındadır.

Aşınan yüzeylere dik olarak alınan kesitlerden optik mikroskop yardımıyla alınan mikroyapı fotoğraflarından bazıları Şekil 11'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü

V [m/s]	F_N [N]	ΔZ_m [μm]	ΔZ_P [μm]	ΔZ_T [μm]	Q_P [kW]	Q_T [kW]	T_1 [K]	T_0 [K]	μk	Q_S [kW]	T_4 [K]
	30	11	50	61	2.15	3	459	467	0.33	0.09	373
	50	17	82	99	3.25	3.3	507	515	0.82	0.041	413
	70	23	92	115	4.5	4.3	563	572	0.71	0.050	436
	95	29	81	110	5.5	4.7	592	605	0.62	0.059	463
	115	38	103	141	7.5	6.6	677	688	0.65	0.075	483
1	140	41	102	143	8.	8.3	740	753	0.61	0.085	498
	160	47	144	191	9	10.5	829	847	0.60	0.096	523
	190	54	162	216	10.5	11	865	885	0.52	0.099	543
	210	50	201	251	10	11.33	915	940	0.41	0.086	593
	250	51	255	306	10	10	933	956	0.36	0.090	628
	280	63	258	321	12.2	9.6	980	997	0.39	0.109	982
	300	78	343	420	15.2	9.6	1033	1060	0.443	0.129	768
0.26		1	18	19	0.045	0.3	334	346	0.50	0.004	338
0.65		5	23	28	0.3	0.33	353	356	0.53	0.010	345
1		11	50	61	1.3	3	459	467	0.33	0.009	373
1.57	30	13	30	43	1.5	3.2	483	489	0.96	0.045	390
2		14	53	67	2.25	2.2	540	550	0.63	0.038	483
2.6		17	45	62	3.6	3.8	613	623	1	0.078	508
3.4		21	79	100	5.7	5.3	678	690	0.95	0.105	526
4		27	108	135	8.7	5.7	729	740	0.9	0.108	565

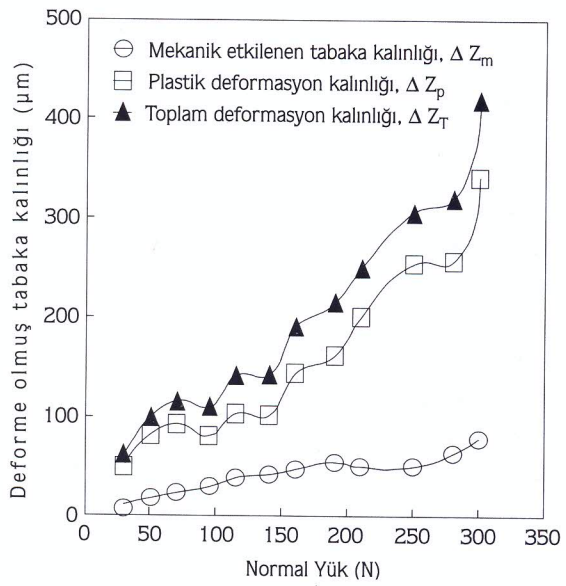
Tablo 1. Deformasyon kalınlığına, sürtünme katsayısına, ısı ve sıcaklığa ait değerler.

gibi yüzeyin hemen altında aşırı derecede ince taneli bir tabaka yer almaktadır. Bu tabakaya "mekanik olarak etkilenen tabaka" adı verildiğinden daha önce bahsedilmişti. Bu tabakadan hemen sonra altda az derecede plastik olarak deformasyona uğrayan, fakat taneleri kayma yönüne paralel olarak uzayan kaba taneli bir bölge yer almaktadır.

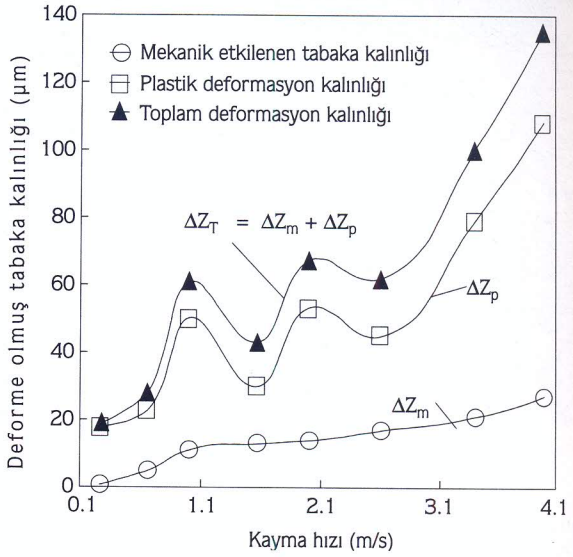
Deformasyon Tabakasının Yük ve Hız ile Değişimi

Tablo 1'deki değerlere göre çizilen Şekil 12 ve 13'den de görüldüğü gibi plastik olarak deforme olan tabaka kalınlıkları genel olarak yük ve kayma hızının artışıyla artmıştır. Fakat yükteki artış deformasyon tabakası kalınlığının artışında daha etkili olmuştur. Bunun başlıca nedeni temas noktalarında daha fazla şekil değişimi olmasına ve dolayısıyla daha fazla ısının artışını sağladığından, sabit yük altında hızın artmasıyla meydana gelen deformasyon kalınlığı daha az olmuştur. Her iki durumdan çıkabilecek sonuca göre deformasyon kalınlığını artıran en önemli faktörün sıcaklık olduğu söylenebilir. Bu durum Şekil 14 ve 15'de açıkca görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi sürekli rejim şartlarında temas yüzeyi sıcaklığı ile hacim sıcaklıkları yük ve kayma hızındaki artışla yükselmektedir. Bunun başlıca sebebi sürtünen yüzeylerde meydana gelen plastik deformasyonun ısıya dönüşmesidir. Her deney şartında pimin hacim sıcaklığı ringin sıcaklığından daima büyük olmuştur. Bu sıcaklık farkı ringin hareketli ve hacminin pimden daha büyük olmasından ileri gelir Ayrıca temas sıcaklığının hacim sıcaklığından büyük olması sürtünme ısısının yüzey ve yüzeyin hemen altında üretildiğini gösterir.

Şekil 12. Deformasyon tabakası kalınlığının yük ile değişimi.

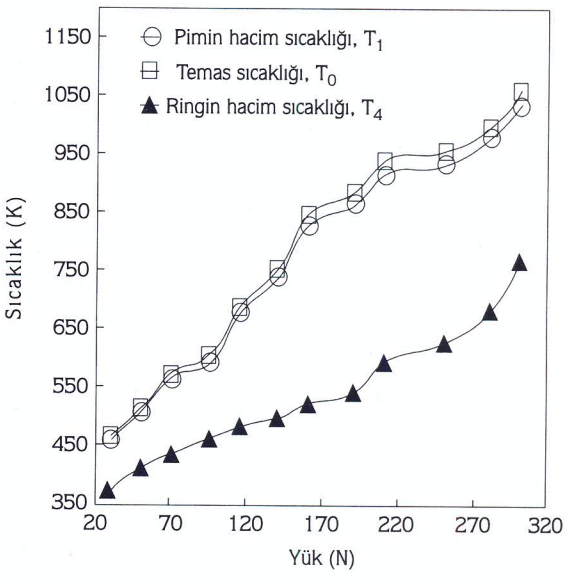


Şekil 13. Deformasyon tabakası kalınlığının kayma hızı ile değişimi.

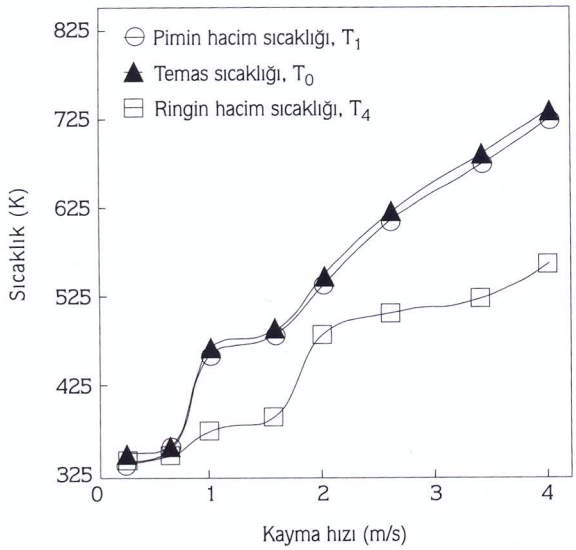


Diğer yandan temas yüzeyinde üretilen ısı $Q_S = \mu_k F_N v$ ile ifade edildiğinden daha önce bahsedilmişti. Bu çalışmada mevcut deney şartları için hesaplanan (Q_S) değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablodaki değerlerden de görüldüğü gibi (Q_S) değerleri 0.009-0.129 kW arasında değişmektedir. Bu değerler toplam sürtünme ısısının yanında ihmal edilecek kadar düşük olmuştur. Bununla beraber esas önemli olan kinetik sürtünme katsayısının yük ve hıza bağlı olarak farklı karakterde değişmesidir.

Şekil 14. Pim-ring sisteminde sürekli rejimde kayma hızı ile değişimi.

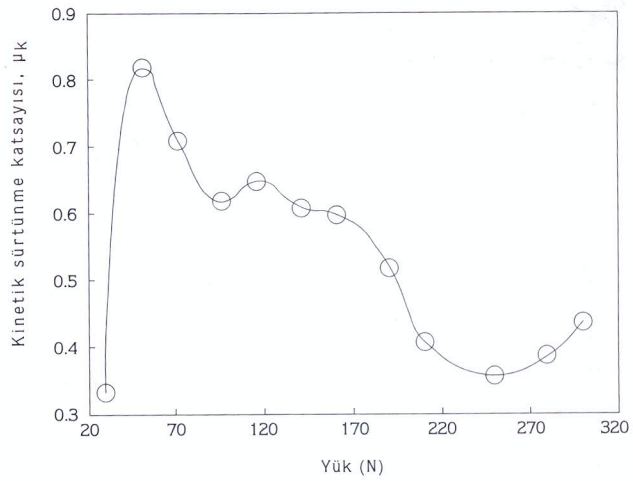


Şekil 15. Pim-ring sisteminde sürekli rejimde kayma hızı ile değişimi.



Şekil 16'da görüldüğü gibi kayma hızının artışına bağlı olarak sürtünme katsayısı 30 N'luk yükte minimum (0.3) iken ani bir artışla 50 N'luk yükte maksimum olduktan sonra düzenli bir azalma göstermiştir. Bu değişimin sebeplerini açıklamak için aşınma taneciklerinin x-ışını yansıtma tekniği ile kimyasal analizi yapılarak oksit türleri belirlenmiştir. Analiz sonucu 30 N'luk yük şartı için sadece α-Fe_2O_3 oksiti, 50-210 N'luk yük aralığı için α-Fe_2O_3 + Fe_3O_4 oksit karışımı ve 210-300 N'luk yük aralığı için ise α-Fe_2O_3 + Fe_3O_4 + FeO oksit türlerinin karışımının meydana geldiği tespit edildi. 30 N'luk yükte aşınan yüzeylerin tamamen α-Fe_2O_3 oksit filmi ile örtüldüğü gözlendi. Uygulanan yükün düşük olması bu oksit filminin kalıcı olmasına imkan vermesinden dolayı sürtünme çiftleri arasındaki temas oksit-oksit şeklinde devam ederek sürtünme katsayısının bir minimum değerde kalmasına sebeb olmuştur. Yükün 50 N'a çıkmasıyla kalıcı oksit filmi yer yer kırılarak temas daha çok metal-metal, kısmen oksit-metal şeklinde devam etmiş ve bu nedenle sürtünme katsayısı ani bir artışla maksimum (0.82) olmuştur. 50-300 N'luk yük aralığında yüzeylerde daha kalın ve mukavemetli oksit filminin teşekkül etme oranının yükle artması oksit-oksit temas oranın da artmasını sağladığından söz konusu yük aralığında sürtünme katsayısı düzenli bir azalma göstermiştir. Bilindiği gibi oksitlenme yüzeyler arasında yağlanma etkisi yaparak sürtünmeyi azaltmaktadır.

Şekil 16. Kinetik sürtünme katsayısının yük ile değişimi.



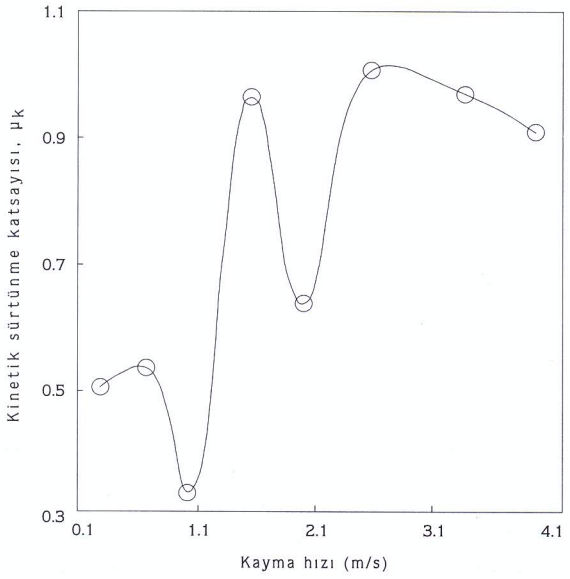
Şekil 17'deki sürtünme katsıyısı-kayma hızı grafiğinden de görüldüğü gibi, sürtünme katsayısı bazı dalgalanmalara rağmen 0.26-2.6 m/s'lik hız aralığında artarak, 2.6 m/s'lik hızda maksimum olduktan sonra, 2.6-4 m/s'lik hız aralığında azalma meyili göstermiştir. Bu değişimin sebebini belirlemek için, ilgili şartlara ait aşınma tanecikleri x-ışını yansıtma tekniği ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 0.26-1 m/s'lik hız aralığı için sadece α-Fe_2O_3 oksiti, 1-4 m/s'lik aralık için ise α-Fe_2O_3 + Fe_3O_4 + FeO oksit karışımı meydana geldiği tespit edilmiştir. Oksit şartları temas şartlarını büyük oranda etkilemektedir. Şekil 17'den de görüldüğü gibi, 1 m/s'lik hızda sürtünme katsayısı minimum olmuştur. Bunun başlıca sebebi α-Fe_2O_3 oksit filminin temas yüzeylerini tamamen örterek temasın oksit-oksit şeklinde olmasına bağlanabilir. Diğer yandan 1-2.6 m/s'lik hız aralığında sürtünme katsayısındaki dalgalı artışın sebebi ise temas yüzeyinde oluşan oksit tabakasının yer yer kırılarak temasın büyük oranda metal-metal, çok az oranda oksit-oksit veya metal-oksit olmasından ileri gelebilir. 2.6-4 m/s'lik hız aralığında yüzeyler daha kalın ve mukavemetli oksit filmi ile örtüldüğünden temasın oksit-oksit olma oranı artmış ve bunun tabi sonucu olarak sürtünme katsayısı azalma meyili göstermiştir.

Plastik Deformasyon Isısının Yük ve Hız ile Değişimi

Teorik bölümde verilen (5) ve (7) denklemlerine göre sürekli rejim şartlarına için hesaplanan plastik deformasyon ısısı (Q_P) ve toplam ısı (Q_T) değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Plastik deformasyon ısısının hesabında, düzeltme faktörü, 1 m/s'lik hız ve 30-300 N'luk yük

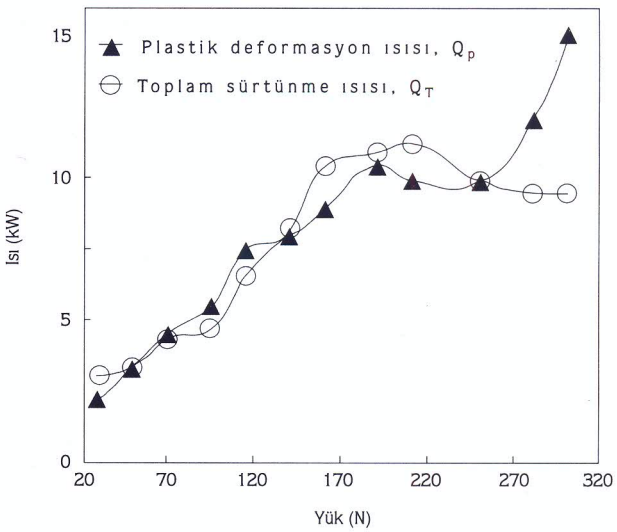
şartları için C_o= 2.5, 30 N'luk yük ve 0.26-4 m/s'lik hız şartları için ise C_o=1.5 olarak kullanılmıştır. Bu faktör $C_o=Q_T/Q_P$ oranlarının ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Şekil 17. Kinetik sürtünme katsayısının hız ile değişimi.

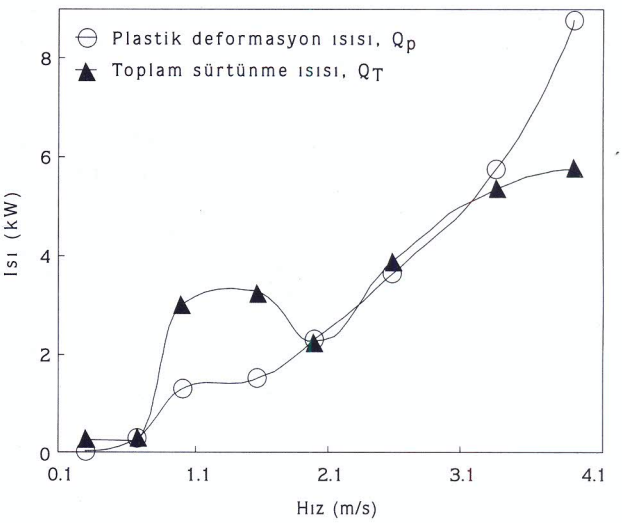


Şekil 18 ve 19'dan da görüldüğü gibi, yük ve hızın artışına bağlı olarak aşınan yüzeylerde ve yüzeyaltı bölgesinde açığa çıkan ısı da artmaktadır. Şekil 18'den açıkca görüldüğü gibi 30-250 N'luk yük aralığında plastik deformasyon ısısı değerleri toplam sürtünme ısısı değerlerinden büyük olmaktadır. Bu farkın asıl nedeni toplam sürtünme ısısı için (6) eşitliği olarak verilen $Q_T=Q_1 + Q_2$ denkleminin karakterinden ileri geldiği söylenebilir. Tablo 1'de verilen sıcaklık değerleri kullanılarak yapılan hesaplarda pime giren ısı miktarı Q_1=0.042-0.151 kW, ringe giren ısı ise Q_2=3-11.2 kW arasında olduğu anlaşılır. Buna göre pim ve ringe giren ısıların oranı =Q_1/Q_2=0.013-0.014 arasında değişir. Bunun anlamı sistemde sürekli rejimde üretilen toplam ısısının % 1-2'si pime, % 98-99'unun ringe geçiyor demektir. O halde toplam sürtünme ısısının hesabında en etkili parametre ringe giren Q_2 ısısıdır. Ringe giren ısıyı gösteren $Q_2=2\pi\ \lambda_2\ b(T_0-T_4)\ \ln(r_1/r_2)$ eşitliğinde tek değişken arasındaki farkın yük ile değişimi incelenirse, bu fark yükle artarak 210 N'luk yük noktasında maksimum olduktan sonra 210-300 N'luk aralığında azalma meyili göstermektedir. Sıcaklık farkındaki bu değişimin karakteri Şekil 18'de görülen toplam sürtünme ısısının değişimine yansımıştır. Ringteki (T_0-T_4) sıcaklık farkının 210 N'luk yükten sonra azalmasının esas sebebi yüzeylerde oluşan film kalınlığının artmasına ve böylece ringe iletimle geçen ısı miktarının azalmasına bağlanabilir.

Şekil 18. Isının yüke bağlı olarak değişimi.



Şekil 19. Isının hıza bağlı olarak değişimi.



Tablo 1'deki 30 N'luk yük ve 1-4 m/s'lik hız şartlarına göre çizilen Şekil 19'dan da görüldüğü gibi toplam sürtünme ısısı ve plastik deformasyon ısısı kayma hızının artışıyla artmıştır. 1-3.4 m/s'lik hız aralığında plastik deformasyon ısısı toplam sürtünme ısısından daha büyük olmuştur. Bu değişikliğin sebebinin ringe giren

ısının (T_0-T_4) sıcaklık farkına bağlı olmadığı anlaşılmaktadır. Çünkü Tablo 1'deki 30 N'luk yük ve 1-4 m/s'lik hız şartlarına ait T_0 ve T_4 sıcaklıklarının farkı alındığında bu farkın kayma hızının artışıyla arttığı görülür. Bu da göstermektedir ki sözü edilen şartlar için oluşan oksit türlerinin yüzeyleri örtme oranı düşük olmuş ve bu nedenle temas daha çok metal-metal şeklinde devam etmiştir. O halde 3.4-4 m/s'lik hız aralığında plastik deformasyon ısısının toplam sürtünme ısısından büyük olmasının başka bir nedeni olabilir. Plastik deformasyon ısısına ait $Q_P = Co\ \Delta Z_m v\ d_1 Hv\ \ln(h_o/h)$ ifadesine göre plastik deformasyon ısısının değerlerini etkileyen tek faktör ($\Delta Z_m v$) çarpımıdır. Tablo 1'den ve Şekil 13'den de görüldüğü gibi 3.4-4 m/s'lik hız aralığında ΔZ_m değerindeki artış daha büyük olmuştur. Bu durum söz konusu hız aralığında $Q_P > Q_T$ olmasının sebebi olabilir.

Yukardaki açıklamalardan plastik deformasyon ısısı için kurulan teorinin yaklaşık olarak 1 m/s'lik hız için 30-250 N'luk yük aralığında, 30 N'luk yük için 0.26-3.4 m/s'lik hız aralığında geçerliği olabileceğini anlaşılmaktadır.

Sonuçlar ve Öneriler

Teorik ve deneysel olarak yapılan bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar şunlardır:

(1) Aşınan yüzeyde ve bu yüzeyin hemen altında malzeme plastik olarak deforme olmakta ve bu deformasyonun derinliği yük ve kayma hızının artışıyla artmaktadır.

(2) Sıcaklığın yük ve kayma hızına bağlı olarak arttığı ve deformasyon derinliğini artıran en önemli faktör olduğu tespit edilmiştir.

(3) Kararlı sürtünmede kinetik sürtünme katsayısı metal-metal temasının devam ettiği yük ve hız değerlerinde, yükün ve hızın artışıyla artar.

(4) Kinetik sürtünme katsayısı kalıcı oksit filminin teşekkül ettiği yük ve hız değerlerinden itibaren yük ve hızdaki artışla azalmaktadır.

(5) Toplam sürtünme ısısı ve plastik deformasyon ısısı yük ve hızın artışıyla artma göstermektedir.

Tek boyutlu ısı transfer bağıntıları kullanılarak analitik olarak hesaplanan toplam sürtünme ısısı değerleri ile teorik hesaplanan plastik deformasyon ısısı değerleri aynı grafikler üzerinde mukayese edilerek, plastik deformasyon ısısı için kurulan teorinin yaklaşık geçerli olduğu ve pim-ring sisteminde üretilen toplam sürtünme ısısının en büyük kısmının plastik deformasyon ısısından meydana geldiği anlaşılmıştır.

Tribolojik sistemlerde aşınan yüzeylerde ve yüzeyaltı tabakalarında meydana gelen sürtünme ısısını dengelemek için enerji kayıplarını kesin olarak tespit etmek mümkün değildir. Bu sebeble özel deney sistemleri geliştirerek bu durumu matematiksel olarak analiz etmek gerekir. Bu çalışmada geliştirilen teorik model sadece pim-ring sistemi için geçerlidir. Diğer standart sürtünme-aşınma sistemleri için ayrı ayrı teorik analizler yapmak ve doğruluğunu deneysel çalışmalarla ispat etmek gerekir.

Semboller

A_1 : Pim numunenin kesit alanı [m^2]

A_h : Lastik diyafram ile numune tutucusu arasındaki temas alanı. [m^2]

b : Ringin genişliği. [m]

C_o : Hata düzeltme faktörü.

d_1 : Pimin çapı. [m]

d_h : Lastik diyafram ile numune tutucusu arasındaki temas çapı [m]

E : Sehim kirişi malzemesinin elastiklik modülü [N/m^2]

F_N : Normal yük [N]

F_S : Sürtünme kuvveti [N]

h_o : Kristal tanenin ilk yüksekliği [μm]

h : Kristal tanenin son yüksekliği [μm]

Hv : Pim malzemesinin ortalama hacim sertliği [N/m^2]

I : Sehim kirişinin atalet momenti [m^4]

K_f : Pim malzemesinin akma mukavemeti [N/m^2]

L : Toplam kayma yolu [m]

L_1 : Pimin tutucu dışında kalan kısmının boyu [m]

I_o : Basınç altındaki elemanın ilk boyu [m]

I : Basınç altındaki elemanın son boyu [m]

L_k : Sehim kirişinin kritik burkulma boyu [m]

m : Pim numunenin geometrik faktörü [m]

Q_P : Plastik deformasyon ısısı [W]

Q_T : Toplam sürtünme ısısı [W]

Q_S : Temas yüzeyinde açığa çıkan sürtünme ısısı [W]

Q_1 : Pime sürekli rejimde eksenel yönde geçen ısı [W]

Q_2 : Ringe sürekli rejimde radyal yönde geçen ısı [W]

r : Ringin mil boşluğunun yarıçapı [m]

r_1 : İçi boş silindirin diş yarıçapı [m]

r_2 : İçi boş silindirin iç çapı [m]

T_o : Temas yüzeyi sıcaklığı [K]

T_1 : Pimin temas yüzeyinden x=1 mm içerdeki hacim sıcaklığı [K]

T_2 : Pimin temas yüzeyinden 4 mm içerdeki hacim sıcaklığı [K]

T_3 : Pimin yanal yüzeyinin sıcaklığı [K]

T_4 : Ringin temas yüzeyinden 2 mm içteki hacim sıcaklığı [K]

$T_ç$: Çevre sıcaklığı [K]

t : Toplam deney süresi [s]

W_P: Plastik deformasyon işi [Nm]

x : Pimin temas yüzeyinden itibaren uzaklık. [m]

V : Mekanik olarak etkilenen bölgedeki malzeme hacmi [m^3]

v : Kayma hızı [m/s]

α_1 : Pim için tabii konveksiyonla ısı iletim katsayısı [$W/m^{2\circ}K$]

λ_1 : Pim malzemesinin ısı iletim katsayısı [W/m °K]

λ_2 : Ring malzemesinin ısı iletim katsayısı [W/m °K]

μ_k : Kinetik sürtünme katsayısı.

ΔZ_m: Mekanik olarak etkilenen tabaka kalınlığı [μm]

ΔZ_P: Plastik olarak deforme olan 2b tabakanın kalınlığı [μm]

ΔZ_T: Toplam deformasyon kalınlığı [μm]

Kaynaklar

Burton, R.A., "Thermal Deformation in Frictionally Heated Contact" Wear 59, 1-20, 1980.

Çapan, L., Plastik Şekil Verme Teori ve Uygulama, Birsen Kitabevi Yayınları, İstanbul, 1984.

Czichos, H., "Towards a General Theory of Tribological Systems", Wear 44, 247-264, 1977.

Hirth, J.P. and Lothe, J., Theory of Dislocations, McGraw-Hill, New York, 1968.

Kakaç, S., Isı Transferine Giriş-I, ODTÜ Yayını, Cilt 1, No 26, Ankara, 1982.

Kar, M.K. and Bahadur, S., "Heat Transfer Analysis for a Pin-on Disc Sliding System", Wear 67, 71-82, 1981.

Kennedy, F.E., J.R., "Thermal and Thermomechanical Effects in Dry Sliding", Wear 100, 453-476, 1984.

Kuhlmann-Wilsdorf D., "What role for Contact Spots and Dislocations in Friction and Wear" Wear 200, 8-29, 1996.

Nabarro, F.R.N., Theory of Crystal Dislocation, Oxford Univ. Press, Chapter 7. Oxford, 1967.

Odabaş, D., "Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Teorik ve Deneysel Araştırılması" Doktora Tezi, E.Ü. Müh. Fak. Makina Müh. Bl, Kayseri, 1991.

Odabaş, D. ve Karamış, M.B., "Hidrostatik Yüklemeli Yeni Bir Pim-Disk Aşınma Deney Tesisatı Tasarımı ve İmalatı" 5. Denizli Malzeme. Sempozyumu Bildiri Kitabı, 412-421, Denizli, 1993.

Odabaş, D., Karamış, M.B. and Kahraman, N., "Pim-Disk Sisteminde Temas Yüzeyi Sıcaklığının ve Sürtünme Isısının Teorik ve Deneysel Araştırılması" 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı, 406-415, Denizli, 1995.

Onaran, K., Malzeme Bilimi, İTÜ 3. Baskı, İstanbul, 1991.

Pakdemirli, E., Çağlayan, E. ve Özdemir, A., Grafostatik ve Mukavemet, Elif Matbaacılık, 153, Ankara, 1973.

Parakevas S. and Dimaroganas, A.D., "The Distribution of Friction Heat Between a Stationary Pin and A Rotating Cylinder" Wear 19, 415-424,1972.

Protasov, B.U. and Kragelskii, IV., "On Heat Generation in External Friction", Soviet Journal Of Friction and Wear 2, 1-6, 1982.

Quinn, T.F.J., "Compuational Methods Applied to Oxidational Wear", Wear 199, 169-180, 1996.

Rigney, R.A. and Hirth, J.P., "Plastic Deformation and Sliding Friction of Metals" Wear 53, 345-370, 1979.

Rosenfield, A.R., "Wear and Fracture Mechanics: Are They Related?: Scripta Metallurgica et Materialia, vol. 24, 811-814, 1990.

Rymuza, Z., "Energy Concept of the Coefficient of Friction "Wear 199, 187-196, 1996.

Saka, N., Eleiche, A.M., and Suh, N.P., "Wear of Metals At High Sliding Speeds" Wear 23, 109-125, 1977.

Şahin, Y., and Murph, S., "Friction and Wear Behaviour of Unidirectional Borsic Fibre-Reinforced Aluminium Alloy", 7.th International Machine and Design and Production Conference Proceedings, 333-342, METU, ANkara, Turkey, 1996.

Tsuya, Y., "Microstructures of Wear, Friction and Solid Lubrication", Tech. Rep. no 81, Mechanical Engineering Laboratory, Tokyo, 1976.

Uetz, H. and Föhl, J., "Wear As An Enerji Transformation Process" Wear 9, 253-264, 1978.

Vingsbo O. and Hogmark S., "Wear of Steels" American Society For Metals, Metals Park, OH., 373-408, 1981.

Yevtushenko A.A., and Ukhanska O.M., "Frictional Heat Distribution between The Cylindirical Elments of Friction Couple "Material Science 29(3), 89-93, 1993.

Yevtushenko A.A., Ukhanska O.M. and Chapovska R., "Friction Heat Distribution Between a Stationary Pin and a Rotating Disc" Wear 196, 219-225, 1996.