

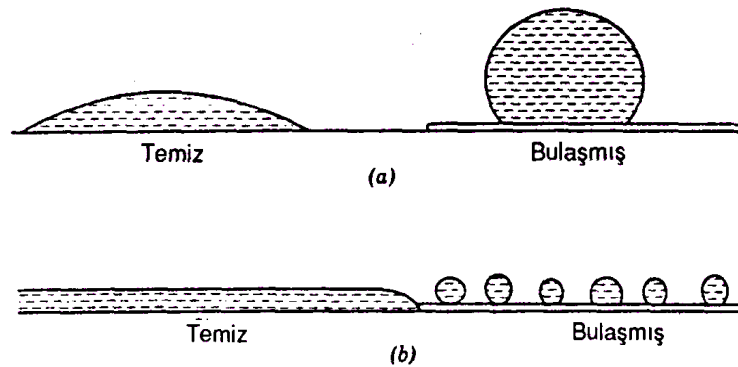
A.II.1.5 Bulaşmamış metotların havada sürtünme özellikleri

Temiz metal yüzeylerinin sürtünmesini betimlemeden önce böyle bir yüzeyin nasıl elden edildiğini görelim.

Yaygın olarak inanıldığı gibi bir gresyağ filmi, metalin üzerinden, aseton veya karbon tetraklorür gibi iyi bir solventle yok edilir. Oysa ki bu, kesin olarak yanlıştır. İleme kadar gresyağ filminin dış tabakaları solventte kolayca eriyorsa da, yaklaşık 30 Å kalınlığında son tabaka metala o denli sıkıca tutunmaktadır ki solvelin kendisinin tüm gres tipi malzemeden tamamen arınmış olmasına kadar eriyik haline geçmeyecektir. Pratikte durum tamamen başka olup teori saflık grade'inde iyi bir solvent içinde yağlama malzemesinden mükemmelen arındırılmış metal yüzeyi solventten bulaştırıcı maddeler kapacaktır; bunlar tek tabaka kalınlığındadır şöyle ki yağlı maddelerin temiz metal yüzeylerine karşı büyük eğilimleri vardır.

Yağlayıcı maddeden arınmış metal yüzeylerinin hazırlanması için başlıca iki yöntem vardır, tiki, bir kesme süreci ile; bunda ya bir temiz abrasif kâğıt ile yüzey sıyrılır ve/veya su altında laplanır veya parlatılır ya da alternatif olacak herhangi bir kesme sıvısı kullanmadan temiz bir takımla talaş kaldırılır. İkinci yöntem ise, daha önce hazırlanmış yüzeyden ya bir kuvvetli kostik soda eriyiği ile muamele ve sonra elda damıtılmış su içinde çalkalamak ya da bir saf organik solvent buharının yüzey üzerinde yoğunlaşarak bulaşmış madenleri beraberinde sürükleyerek gitmesini sağlayarak yağlayıcı madde filmini eritmekten ibarettir. Göreceli olarak temiz olmakla birlikte bulaşma maddesinden eser miktarda içeren bir yüzey daha sonra bir eş yüzeye sürtülerek temizlenebilir. İki yüzeyin birbirleri üzerinde kaymaları sırasında oluşan aşınma bakiyeleri ile birlikte bulaştırıcı madde tedricen kaldırılır.

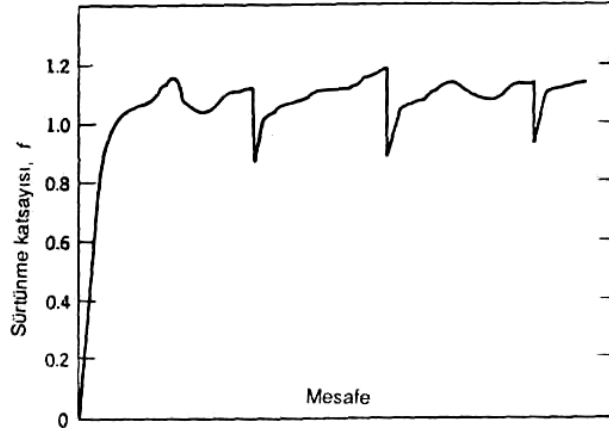
Bir metal yüzeyin temizliğini doğrulamak için çoğu kez iki basit deney kullanılır (Şek. 57). Birinde metal yüzeyine bir damla su damlatılır; bu, temiz yüzey üzerinde liniform olmak yayılır, ama bulaşmış yüzey üzerinde iyice belirlenen bir küreli oluşturur. İkinci deneyde yüzey üzerine hafifçe hohlanır ve böylece burada rutubet yağıştırılır. Rutubetin küçük su zerrecikleri haline gelmesi durumunda, yüzey bulaşmış demektir. Temiz yüzeyde uniform ve görünmez bir film oluşturur. Bu her iki deney aynı bir olguya, yani suyun bir yağlayıcı madde filmini ıslatmadığına, buna karşılık temiz metal yüzeyini ıslattığına dayanır.



Şek. 57.- (a) Bir su damlasının bir metal yüzey üzerinde görünümü. Yüzey temizse damla yayılmaya devam eder. (b) üzerine hohlandıktan sonra metal yüzeyi. Rutubet damlacıklarının görünür olmaları halinde yüzey bulaşmıştır.

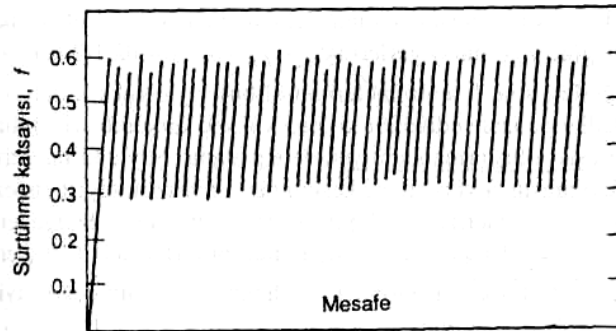
Yağlayıcı maddeden alındırılmış iki metal yüzeyi birbiri üzerinde kaydığında, karşılaşılan sürtünme tipi, temas eden metalimin cinsine ve daha az ölçüde olmak üzere, başka değişkenlere yani yük, yüzey alanı, yüzey pürüzlülüğü ve hıza bağlı olarak değişir". Genel kaide olarak iki davranış tipi mutattır. Bunlar ağır (şiddetli) sürtünme davranışı ile yumuşak sürtünme davranışı olarak tanımlanır ve her birinin tipik belirtileri betimlenir. Bu arada, bazı durumlarda sürtünme davranışının bir her ikisi arasında sürekli olarak gidip geldiği de kaydedilecektir.

Şiddetli sürtünme davranışı. Sürtünme katsayısı yüksektir (genellikle 2,0 ilâ 0.9 arasında). Sürtünmeyi iyi ve hızlı cevap alacak şekilde saptayan bir tertip kullanıldığında, sürtünme kuvvetinin anî değerlerinde düzensiz büyük dalgalanmalar olduğu görülür (Şek. 58). Yüzeylerin kaymadan soma tetkiki, yüzeylerden birinin öbürüne dalıp oluk açan çıkıntı uçlarının bulunmasıyla birkaç çizik gösterecektir; bu çizikler büyük ve genellikle düzensiz görünümde kenarları vardır. Mikroskopta muayene bir yüzeyden öbürüne intikal etmiş iri taneciklerin (50 μ nu geçen çapta) saptar.



Şek. 58.- Şiddetli sürtünme davranışı veren yüzeylerle elde edilen tipik sürtünme izi

Yumuşak sürtünme davranışı. Sürtünme katsayısı daha alçaktır.(genellikle 0,7 ila 0,3).Bu katsayı ya istikrarlı ya da muntazam “yapışma-kayma” tipindedir ki bu sonucunda sürtünme kuvveti düzenli şekilde iki iyi saptanmış uç pozisyon arasında dalgalanır.(şek.59)yüzeylerde çok sayıda nice çizgiler saptanır.



Şek:59 Yumuşak sürtünme davranışını gösteren tipik sürtünme izi (yapışma-kayma)

yüzeylerden birinin küçük çıkıntıları öbüründe çizgi kazımıştır. Küçük (çapı genellikle 25 μ m' un altında) tanecikler bir metalden öbürüne intikal etmiştir.

Genel kaide olarak şiddetli (ağır) sürtünme davranışı, iki kayan yüzeyin aynı, ya da birbirlerine çok yakın metallere oluşmaları halinde görülür ki bu olgu, iki metalin alıştırma teşkil etme, ya da metallere birinin atomlarının öbürünün bir şebekesi' nin içinde önemli ölçüde eriyebilme kabiliyeti ile izah edilir. Örneğin bakır üstünde bakır, 1.0 in üstünde yüksek sürtünme arz eder çünkü aynı metal her iki kayan yüzey için kullanılmıştır. Oysa ki alüminyum, ya demir, ya da alçak karbonlu çelik üzerinde, 0.8 ve daha yukarı yüksek sürtünme arz eder şöyle ki bu iki metal kuvvetle etkileşimler ve bir dizi metallere arası bileşikler oluştururlar. Her iki sistemde de ciddi yüzey hasarı vaki olur.

Metallerin birbirlerine benzememeleri ve birbirlerine karşı alçak eğilimli olmaları halinde, yumuşak kayma koşulları, kaide olarak, başat olur.

Uyuşmazlık kriterinin, her iki metalin yüzey atomlarının birbirlerinin şebekesi içine yayıldıklarını tazammun etmediği açıkça belirtilecektir; gerçekten, birçok kayma durumlarını niteleyen alçak hararet artışı ve kısa temas süreleri, fark edilebilir miktarlarda difüzyona imkân vermez. Buna karşılık, sürtünme davranışının ne zaman yumuşak veya şiddetli olduğunun saptanmasında kriterin,

$$W_{ab} = Y_a + Y_b - Y_{ab}$$

denkleminin kriteri ile çok yakından ilişkili olduğu kaydedilecektir. Bu kriter W_{ab} nin küçük ya da büyük olduğunu saptar ki burada Y_a ile Y_b , iki a ve b malzemesinin yüzey enerjileri; Y_{ab} , yüzeyler arasın enerji ve W_{ab} de a ve b ; malzemeleri arasında 1 cm^2 yüzey arasını ayırmak için uygulanması gereken enerjisidir. Toplanan verilere göre Y_{ab} nin değerleri ($Y_a + Y_b$) nin $1/4$ ilâ $1/2$ si mertebesindedir. Küçük değerler, a ve b ; malzemelerinin birbirleriyle yüksek derecede uyuşabilir olmaları hallerine izafe edilebilir ki bu, yüksek karşılıklı eriyebilme ya da metallere arası birleşik oluşturma kabiliyetiyle ispatlanır. Şöyle ki bu durumlarda a ile b ; malzemeleri arasında yüzey arası keskin bir süreksizlik teşkil etmez ve dolayısıyla de küçük yüzey enerjisine sahiptir, a ile b ; nin aynı malzemedir oldukları uç durumda, $Y_{ab} = 0$ 'arz ediyoruz. a ile b nin birbirleri içinde hiç erimemeleri ve metallere arası birleşik oluşturmamaları halinde Y_{ab} nin değeri iyice yüksek olur. Böylece de üç durum dikkate alınır:

$$a \text{ ile } b \text{ eş } \text{ ise } = 2 Y_a$$

$$a \text{ ile } b \text{ uyuşabilir } \text{ ise } \sim 3/4 (Y_a + Y_b)$$

$$a \text{ ile } b \text{ uyuşamaz } \text{ ise } \sim 1/2 (Y_a + Y_b)$$

If^nin yüksek değerleri fena kayma koşullarına bağlıdır. Buradan çıkan sonuç şöyle ifade edilir: kayan her iki yüzey için aynı malzemenin kullanılması fena, birbirine benzemeyen ama uyuşabilir malzemelerin kullanımı şüpheli, birbirleriyle uyuşmaz malzemelerin kullanımı en iyisidir.

Yağlanmamış metallere sürtünmesi üzerinde yukarıdaki mülâhazalar, bu metallere fiziksel ve mekanik özelliklerinin bunların sürtünme davranışlarını esas itibariyle saptadıkları varsayımına dayanmaktadır. Ancak bunun herkes tarafından kabul edilmiş bir görüş olmadığı kaydedilecektir. Nitekim bazı araştırmacılara göre yüzey arasındaki oksit filminin büyük rolü vardır şöyle ki bu filmler sürtünme ve aşınmayı azaltırlar ve bunların mekanik özellikleri (örneğin sertlik) çok önemli

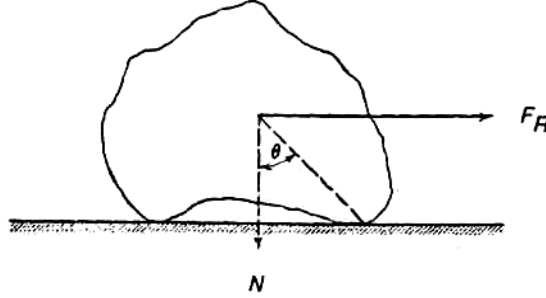
olmaktadır.

Mamafih her iki metalin etkileşimi makul ölçüde yüksek yüklerde daha da önemlidir.

A.II.1.6 Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, bir cismin ona yaslanan bir yüzey üzerinde yuvarlanması sırasında harekete karşı yer alan dirençtir. Başlarken iki ayrı durum tefrik edilecek olup ilkinde, yuvarlanan cisim bir kaya parçası veya çakıl gibi intizamsız bir dış profili haizdir; öbüründe ise cisim yüksek geometrik mükemmellikte bir düzgün yüzeyi haizdir (tekerlek...).

Birinci durumda (Şek. 60), yuvarlanma hareketini başlatacak olan F_R kuvveti



Şek. 60.- İntizamsız bir cisimde yuvarlanma sürtünmesi kuvveti

N Ig O ya eşit olacak ki burada bir N , yük ve θ de dikey ile yuvarlanmanın üzerinde vaki olacağı izdüşümle ağırlık merkezini birleştiren çizgi arasındaki açıdır. Böylece de

$$\mu_R = F_R / N = \tan \theta$$

denklemine uygun olarak bir yuvarlanma sürtünmesi katsayısını tanımlayabiliriz. Bu arada cisimle yer arasındaki kayma sürtünmesi katsayısının $\tan \theta$ dan az olması halinde, bir teğetsel kuvvetin uygulanmasıyla yuvarlanma yerine kaymanın vaki olacağı kaydedilecektir.

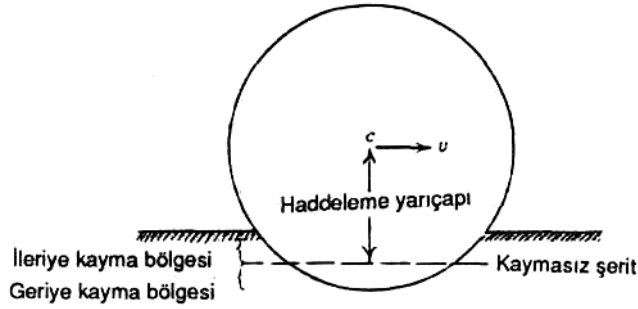
Yuvarlanma devam ettiğinde θ değişir, çoğu kez de bir negatif değer alır. Dolayısıyla de yuvarlanmayı sabit hızda tutacak sürtünme kuvveti pozitif olduğu kadar negatif değerlere varır. Ortalamada, yuvarlanmayı devam ettirmek için gerekli kuvvet, yuvarlanmayı başlatmak için gerekli olandan çok daha azdır; başka deyimle, yuvarlanma sürtünmesinin kinetik katsayısı, statik katsayıdan az olur.

Mamafih yuvarlanma sürtünmesi terimi genellikle mükemmel şekle yakın ve çok küçük yüzey pürüzlülüğünü haiz cisimlere mahsustur. Bu tür cisimlerde sürtünme kuvvetinin pürüzlülük bileşeni çok düşük olup bunun sonucunda çok alçak sürtünme kuvvetleri gözlenir, yuvarlanma sürtünmesi katsayıları da genellikle $5 \cdot 10^{-3}$ ilâ 10^{-5} arasında olur. Harekete direnç herhangi bir başlıca nedenden ileri gelmeyip nedenlerin birleşmesinden hasıl olur ki bu nedenlerin her biri bazı durumlarda daha belirgin, bazılarında da daha az önemli olur. Bunları sırayla ele atalım.

Temas bölgesinde kayma. İki cismin, meselâ bir düz yüzey üzerinde bir kürenin teması bir nokta olsaydı, saf yuvarlanma koşullarının başat olacaklarını düşünürdük. Pratikte ise temas bölgesi elastik (ve uç durumlarda) plastik olarak şekil değiştirmiştir şöyle ki temas belli boyutta bir alan üzerinde vaki olur ve bunun içinde noktalar farklı düzeylerde bulunur (Şek. 61).

Bunun sonucunda saf yuvarlanma hareketinin yer alması, çok az sayıda nokta dışında, mümkün olmaz ve tüm öbür «lalarda, yuvarlanma ile birlikte az derecede kayma olacaktır. Bu

kaymayı ger-çekleştirmek için yüzey arasında kayma direncini yenmemiz gerekir ki bunun için bir yuvarlanma sürtünmesi kuvvetinin harekete geçmesi lâzımdır.



Şek. 61.- Bir küre hız düz yüzey üzerinde yuvarlanıyor. İleri ve geri kayma bölgeleri kaydedilecek.

Her ne kadar kayma hızları genellikle az ise de (mutat olarak topluca yuvarlanma hızının % 5' i ya da daha azı) bu küçük miktar birçok durumda yuvarlanmaya toplam direncin büyük bölümünü hasıl etmektedir. Toplam u_R yuvarlanma sürtünmesi katsayısı için

$\mu_R = v_s / v_r \cdot \mu_K$ yazabiliriz ki burada v_s ,kayma hızı; v_r , yuvarlanma hızı ve u_K , kayma sürtünmesinin kinetik katsayısıdır.

Histeresis kayıpları. Yuvarlanma sırasında küre ile düz yüzey üzerinde çeşitli bölgeler önce gerilirler ve sonra gerilme, yuvarlanma devam ettiğinden salıverilir ve temas noktası üzerine gelir. Her iki cisimde bir hacim elementi gerildiğinde her zaman elastik enerji cisim tarafından kapılır. Bu enerjinin çoğu, cismin elementinden gerilme kalktığında salıverilir ama bunun bir küçük kısmı, ısı şeklinde, kaybolur. Bu, temas eden cisimlerin yapıldıkları malzemenin elastik histeresisinden ötürüdür. Bu sürekli enerji akıtılışı, yuvarlanma kuvveti tarafından iyileştirilecek olup böylece yuvarlanma sürtünmesi katsayısına bir başka bileşen eklemiştir.

Bu toplam yuvarlanma sürtünmesi katsayısının histeresis komponenti bazı durumlarda az, yani 10^{-4} den az, ama muhtemelen, çoğu durumda, toplam yuvarlanma katsayısına başlıca katkıda bulunmaktadır.

Yuvarlanma sürtünmesinin kanunları

Kayma sürtünmesininkilere benzer yuvarlanma sürtünmesinin nicel kanunlarını onaya koymak «üçtür .şöyle ki, yukarda zikredilmiş olan mekanizmaların her birinin kendisine özgü, tamamen laikli kanunları vardır ve topluca sürtünme katsayısı, yuvalanma sürtünmesi kuvvetinin, bahis konusu özel sistemde hangi komponentlerinin en önemlisi olduğuna bağlı olacaktır. Mamafih bazı genellemeler yapılabilir.

1-)Sürtünme kuvveti yükün 1,2 ilâ 2,4 arasında olan bir üssü olarak değişir. Temasta Şekil değiştirmenin sadece elastik olduğu hafifçe yüklenmiş sistemlerde, sürtünme kuvveti genellikle yükün aşağı üssü (meselâ 1,3) olarak değişir. Temas alanında plastik şekil değiştirmenin vaki olduğu ağır yüklenmiş sistemlerde, sürtünme kuvveti yükün daha yüksek bir üssü, meselâ 2,0 olarak değişir.

2-)Sürtünme kuvveti, yuvarlanan elementlerin kavis yarıçaplarıyla ters orantılı olarak değişir.

3-)Sürtünme kuvveti, pürüzlü yüzeydekine gene düzgün yüzeylerde daha aşağıdır. Gerçekten, az çok her zaman bir yuvarlanma teması sürtünmesi sırasında düşer şöyle ki bu süre

içinde yuvarlanma etkisiyle yüzey düzgünlüğü altmıştır.

4-)Sertlik sürtünme kuvveti genellikle kinetik kuvvetten çok daha büyük olmakla birlikte kinetik, her ne kadar yuvarlanma hızı arttığında genellikle az çok düşürse de, yuvarlanma hızına az bağlıdır.

Bir genel özet olarak yuvarlanma sürtünmesi kuvvetinin, uygulanan yükün çok küçük bir kesri olup çeşitli etkenler tarafından hasıl edildiği söylenebilir.

A.II.1.7 Sürtünen yüzeylerin sıcaklığı

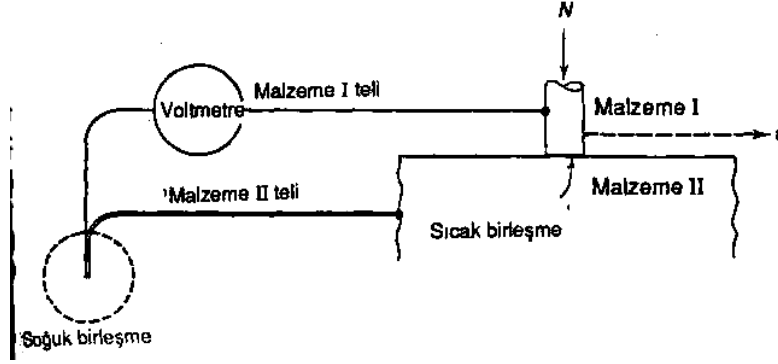
Yüzeyler birbirleri üzerinde kaydıklarında sürtünmede dağılan az çok tüm enerji, yüzey arasında ısı şeklinde belirir; gerçekten tarihî olarak ilk kez mekanik enerji ile ısının eş değerliği bir sürtünme deneyi ile ispatlanmıştı. Bu sürtünme ısısı, yüzey arası sıcaklığı çevreninkinin üstüne çıkarır.

Daha önce gördüğümüz gibi, kayma durumlarının çoğunda temas, görünür temas alanının tümünün üzerinde değil, birkaç bireysel birleşme üzerinde olur. Bunlar küçük oldukları ve önemli miktarda ısı enerji aldıklarından, bunların sıcaklıkları, komşu yüzey bölgelerinkinden çok daha yüksek olabilir. Birleşmelere bağlı bu yüksek sıcaklık çoğu kez "şimşek sıcaklık-flash temperature" diye adlandırılır. Kayma sırasında birleşmeler oluşup kopmaya devam ederler ve yüzeylerdeki "sıcak noktalar", yerlerini değiştirirler. Bununla birlikte bu sıcak noktaların herhangi birinde varılmış şimşek sıcaklığı, sabit kayma koşulları altında makul ölçüde sabit kalma eğiliminde olur.

Birçok durumda, kayma sırasında meydana gelen şimşek sıcaklığı ölçebilme faydalı olur. Örneğin, kayma temasında olan malzemelerden birinin mekanik mukavemeti sıcaklık artınca keskin şekilde düşüyorsa, kayma sırasında varılan maksimum sıcaklığın (yani, malzemenin kitle sıcaklığına eklenecek olan sıcaklık komponenti) hesap edilmesi önemli olmaktadır. Böylece de malzemenin yapısal gerekleri karşılayabilip karşılayamayacağı belli olur.

Başka koşullar altında ise bir yağlayıcı mevcut olabilir ve bu yağlayıcı ancak belli bir kritik sıcaklığın altında etkin olarak işlevini yerine getirebilir veya belli sıcaklıkların üstünde ayrışmaya başlar. Bütün bu durumlarda kayma sırasında hasıl olan maksimum sıcaklıkları hesap edebilmek önemli olmaktadır.

Her ne kadar maksimum sıcaklık, bir kitle sıcaklığı artışı ve bir şimşek sıcaklığı artışı olmak üzere iki komponentten oluşuyorsa da genelde sonuncusu ile daha çok ilgilenilir şöyle ki ilki çoğunlukla az olup kolaylıkla ölçülebilir. Bununla birlikte sonuncusu büyük güçlükler arz etmektedir. En iyi ölçme tekniği, tetkik edilecek kayan yüzey arasını bir termoçiftin bir kolu yapmaktan ibaret olup bu, malzemelerimizin kalibrasyonundan sonra, birleşmelerdeki ortalama sıcaklığı verir (Şek. 62). Bu yöntem, birçok malzeme terkipleri ancak alçak bir termoelektrik hassasiyetinin



Şek. 62.- Kayan yüzey arasında sıcaklığı ölçmenin termoçift yönteminin şematik gösterilişi

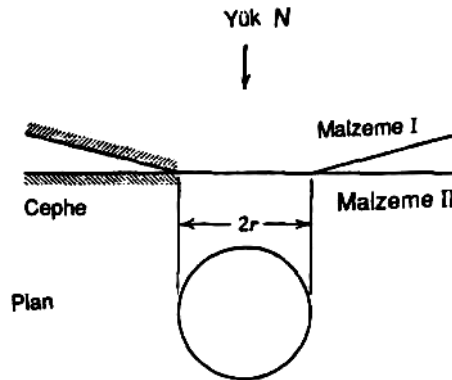
haiz olup herhangi bir durumda sadece birbirinde farklı malzemeler, her biri de elektrik iletkeni olacak kaydıyla, bu ölçümlerde kullanılabileceğinden, kolay değildir. Mamafih birçok araştırmacı bu yöntemi kullanmış olup ölçülen şimşek sıcaklığı artışı genellikle %30 kadar bir yaklaşıklıkla teorik hesaba uygun düşmüştür.

Bittabi, yüzeylerin şimşek sıcaklıklarını ölçmek yerine bunları hesap etmek genelde yeğlenir.

Bunun için gerekli irade artık bilinmektedir. Büyük ölçüde basitleştirilmiş durumda, yani temasın $2r$ çapında ve bir başka malzemeden düz bir yüzey üzerinde bir ılımlı hızla kayan bir dairesel birleşmeden ibaret olması halinde (Şek. 63), yüzey arası, malzemenin geri kalanının sıcaklığının üzerinde bir ortalama O_m denge sıcaklığına varır: bu sıcaklık

$$\theta_m = \mu N v / 4 J r (k_1 + k_2) \quad (1) \quad \text{ile verilir.}$$

Burada J , ısının mekanik eşdeğeri ve k_1 ile k_2 , temas eden iki malzemenin ısıl iletkenlikleridir. Bu, ılımlı hızlara uygun bir basitleştirilmiş ifadedir, Gerçekten büyük hızlarda ısı yükselmesi formülü çapraşık ve simetrik olmayan bir hal alır zira II yüzeyine çok daha fazla ısı akar, o da sürekli olarak ısının hasıl olduğu bölge, yani yüzey I içine yeni, soğuk malzeme gönderir ki bu sonucunun ayrı kısmı daima yüzey arasında kalır, ρc hacim özgül ısısı ise



Şk.63-Farz edilen birleşme modeli

$$\theta = \frac{\mu N v}{3.6 \pi J [1.1 k_2 + (\rho_1 c_1 \cdot r v k_1)^{1/2}]} \quad (2) \quad \text{olup.}$$

bu çok yüksek kayma hızlarında

$$\theta = \frac{\mu N v^{1/2}}{3.6 J [(\rho_1 c_1 \cdot r^3 k_1)^{1/2}]} \quad (3) \text{ şeklini alır.}$$

Mamafih, genellikle, fazla hata yapmadan basit (1) denklemi kullanılabilir. Burada bir husus belirtilecektir: N bir kuvvet olarak tanımlanmıştır. Çoğu kez N , bir kitle olarak tanımlanır ki bu takdirde (1) ilâ (3) denklemlerinin payında g yerçekim ivmesi de bulunacaktır

(1) denklemini kullanarak O_m 'in hesabına girişeni maalesef biri küçük, ikisi büyük zorluk beklemektedir. Önce, kendi kayma durumuna uygulanabilecek olan sürtünme katsayısını talimin edecektir ki bu, %30 mertebesinde bir belirsizlik getirir. ikinci olarak o anda ısının meydana getirildiği birleşmelerin r boyutunu talimin edecektir. Bunda talimin, 10 kat mertebesinde yanılığa götürebilir. Üçüncü olarak da, ısının tek bir birleşmede değil, birçok birleşmede meydana geldiğini kabul edecektir ki bu, her birleşmedeki N yükünün hesap edilip bunların karşılıklı etkileri tahmin edilecek demektir.

Bu durumda mevcut zorlukların sonucu olarak, kaymada hasıl olan ısıyı hesap etmeye kolayca girişilmez. Bunun yerine, deneylere dayanılarak iyice yerleşmiş ama birbirinden ayrı iki prensibe başvurulur:

1.) Bir kayan yüzeyde şimşek sıcaklık mutad olarak, temas eden yüzeylerin ortalama sıcaklığından ancak biraz yüksektir.

2.) Şimşek sıcaklık mutad olmak, kayan iki malzemenin en aşağı ergime sıcaklığıdır. fiilî yüzey sıcaklıklarının gerçekçi bir mertebesini elde etmek için çoğu kez basit

$$B_m = v/2 (\pm \text{bir } 3 \text{ faktörü}) \quad (4)$$

formülü kullanılmış olup burada O_m , " F olarak şimşek sıcaklık ve v de ft/dak olarak kayma hızıdır. Bu basit formül genellikle 2 veya 3 faktörü yakınlıkla, şek. 62'de görülen termoçift yöntemleriyle ölçülmüş sıcaklık artışına uymaktadır. Bu iyi uygunluk özellikle, parametreler içeren (1) denklemiyle şaşırtıcı olmaktadır şöyle ki uygulanmış yük ve birleşme çapı gibi parametreler, uygulamadan uygulamaya açıkça değişir.

Yüzey enerjisi yöntemleri kullanılarak şimşek sıcaklığın hesaplanması

İlk kez, sürtünme süreci teorisindeki son gelişmeler, temas halindeki yüzeylerin birleşme boyutları için mertebesine uygun ifadeler çıkartmayı mümkün kılmıştır ve bu da bize sıcaklık artış formülüne yine başvurma olanağını sağlamıştır. Bu hesaplara göre bir birleşmenin r yarıçapı için

$$r = 12\,000 \gamma/p \quad (5)$$

şeklinde bir ifade yazılabilir burada Y , en yumuşak malzemenin yüzey enerjisi, p de sertliğidir.

Bunun dışında, toplam temas alanının en yumuşak malzemenin plastik deformasyonu ile saptanmış olduğu bir tipik kayma durumu için her birleşme taralıdan taşınan N yükü ile her

birleşmenin yarıçapı arasında

$$N = \pi r^2 p \quad (6)$$

denklemlerle belirtilmiş bir münasebet bulunmaktadır.

(1) denkleminde N ve sonra rp çarpımını için değiştirilince

$$\theta_m = \pi \mu \times 3000 \gamma v/J (k_1 + k_2) = 9400 \mu \gamma v/J (k_1 + k_2) \quad (7)$$

nihaî ifade bulunur. Bu ifade, kayma hızı dışında, malzeme sabitesi veya tahvil faktörü olmayan hiçbir parametreyi içermiyor. Ve şimdi, birkaç çok ağır yüklü kayma durumları dışında çoğunlukla doğrulanmış nihaî kabule geçelim: bireysel birleşmeler birbirlerinde o denli uzaktadırlar ki komşularının şimşek sıcaklığına önemli bir etkide bulunmazlar ve böylece de (7) denklemini, şimşek sıcaklığı için nihaî değer olmaktadır.

(7) denklemini uygulandığında ortaya bir birim sorunu çıkar. Sürtünme katsayısı bittabi bir saf sayıdır ama kayan en yumuşak malzemenin Y yüzey gerilimi genellikle dyne/cm birimiyle verilir ve sonra k , c.g.s. (santimetre-gram-saniye) cal/°C. cm. sn. birimleriyle; v , cm/sn olarak verilmişlerse θ , J nin erg/cal cinsinden olması halinde, °C cinsinde olacaktır. Bazı tipik sıcaklık artış değerleri Tablo 30' da verilmiştir. Bütün bunlarda yüzeylerin yağlanmamış olduğu farz edilmiştir.

Tablo 30.- Birim kayma hızı başına hesaplanmış sıcaklık artışı

Malzeme terkibi	μ	γ	k_1	k_2	θ/v (°C/cm/s)
Çelik üstüne çelik	0.5	1500	0.11	0.11	0.75
Çelik üstüne kurşun	0.5	450	0.08	0.11	0.26
Bakelit üstüne bakelit	0.3	100	0.0015	0.0015	2.2
Pirinç üstüne pirinç	0.4	900	0.26	0.26	0.15
Çelik üstüne cam	0.3	500	0.0007	0.11	0.3
Naylon üstüne çelik	0.3	120	0.11	0.0006	0.07
Naylon üstüne pirinç	0.3	120	0.26	0.0006	0.03
Bronz üstüne çelik	0.25	900	0.11	0.18	0.17

Tablodan θ/v değerlerinin y ve k nin bireysel değerlerine göre, çok daha uniform oldukları görülür zira, göreceli olarak alçak k değerlerine sahip metal dışı malzemeler, aynı zamanda alçak Y değerlerine de sahiptirler. Böylece θ/v oranı sabitliğe doğru meyilemekte olup tablonun tetkikinden değişik θ/v değerlerinin genellikle 0,5 °C /cm/sn değerlerinin etrafında yaklaşık bir 3 faktörü içinde yer aldıkları görülür ki bu da yaklaşık 0,45 "F/ft/dak değerine tekabül eder. Böylece de bu, (4) denkleminin ampirik münasebetine bir nevi teorik destek olmaktadır.

Her ne kadar (7) denkleminde tanımlanmış şimşek sıcaklık artışı kavramı hâlâ çok yeni olup geniş pratik durum çeşitleri üzerinde deneysel olarak saptanacaksa da (4) denklemini gibi ampirik münasebetleri sağlam bir teorik esasa oturtmaya yaramaz. Kayma hızı ile sıcaklık artışı arasında bir nevi doğruca münasebetin varlığından mühendisler faydalanabilirler.

A.II.1.8 Sıcaklıkla sürtünme arasındaki ilişki

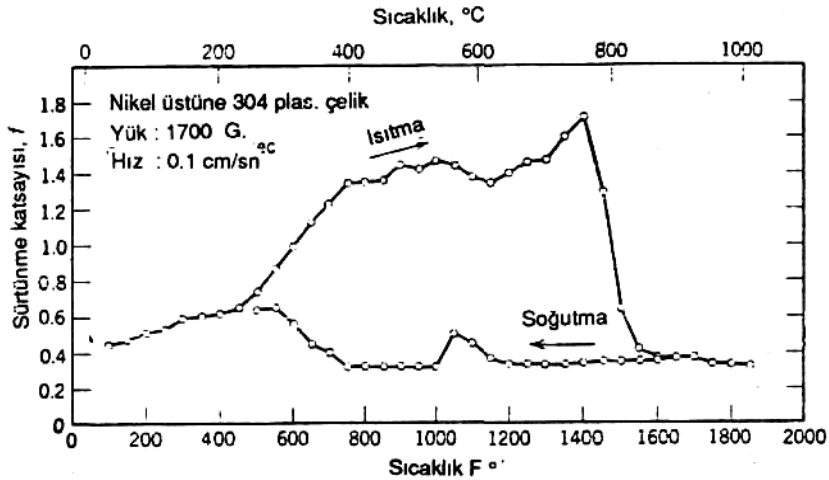
Burada sıcaklık değişmesi sonucunda sürtünmede vaki olan değişmeler irdelenecektir. Dikkate alınacak iki farklı tür sıcaklık değişmesi vardır. İlkinde iki kayan ve dış ısıtma ya da soğutma ile kitle sıcaklığı değişen cisim vardır; ikincisi yukarıda irdelenmiş, sıcaklık artışının yüksek hızla kaymadan ötürü olduğu durumdur, şöyle ki bir soğuk alt tabaka üzerine oturtulmuş bir sıcak yüzey tabakası mevcuttur.

Yüksek hızla kayma sırasında, $u = s/p$ denkleminde s alçak ve p de yüksek olduğundan sürtünme katsayısının genellikle alçak olduğu mülahazasıyla bu ikinci hali bir kenara bırakabiliriz. Bir miktar yüzey ergimesinin vaki olduğu (genellikle ergime yağlaması olarak anılır) çok yüksek hızlarda sürtünme katsayısının çoğunlukla 0,1 in altında olduğu gözlenir.

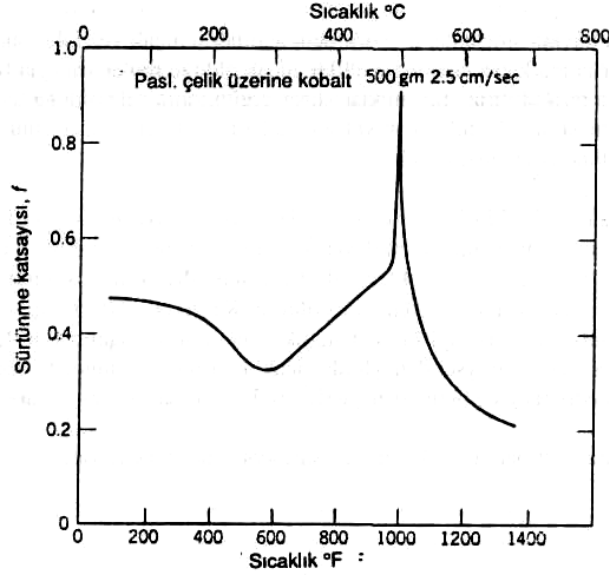
Dıştan uygulanmış sıcaklık değişmelerinde sürtünme katsayısının sadece kayan cisimlerin mekanik mukavemetini etkileyen sıcaklık değişmelerine duyarlı olmadığı kaydedilir şöyle ki $u = s/p$ denkleminde hem makaslama mukavemeti hem de sertlik terimleri aynı derecede etkilenmiş olurlar. Keyfiyet, -270 °C ile + 300 °C arasında sürtünmede herhangi bir sistematik yönelimin rastlanmadığı deneylere dayanır. Her ne kadar bireysel deneylerde sıcaklık artınca sürtünmede önemli değişmeler kaydedilmişse de bütün deneylerin ortalaması esasta değişme arz etmez.

Oda sıcaklığından itibaren sıcaklığın değişmesiyle sürtünmede vaki olan değişme nedenlerinin bazıları şunlardır:

1.) Ağır sürtünme etkileşimi arz eden metal birleşimlerinde, yaklaşık 1.0 den 0,5 e bir sürtünme düşmesi, genellikle dar bir sıcaklık malığında gözlenir. Bu düşmenin nedeni kalın bir oksit tabakasının oluşması ve azalan metalik etkileşimdir (Şek. 64). Sıcaklık azaltılırken kayma devam edecek olursa, bir karakteristik "histeresis gözü" meydana çıkar.



Şek. 64.- Nikel üstünde paslanmaz çelikte sıcaklığın fonksiyonu olarak sürtünme. 1500 I da oluşmuş nikel oksidi tabakası soğumada kalır.



Şek. 65 - Paslanmaz çelik üzerinde kobaltta sıcaklığın fonksiyonu olarak sürtünme. 1000 °F da sivrilik. Co₃O₄ oksit türünden Co O türüne değişmeye bağlanabilir.

2.) Birçok metalde sürtünmede ya yukarı, ya da aşağı doğru değişmeler olur; bunun nedeni bir başat oksit türünün yerini daha çok ya da daha az yağlama kabiliyetini haiz başka oksidin almasıdır (Şek. 65).

3.) Cisimlerden birinin ergime sıcaklığına yaklaşıldığında sürtünmede bir yükselme her yerde gözlenir. Bu yükselme, aşağı ergimeli cisimde Y/p oranı ve bunun sonucunda sistemde W_{ab}/p oranının, sıcaklıkların ergime noktasına varmalarıyla hızla artması nedenine bağlanır şöyle ki Y nın sıcaklıklardan az etkilenmesine karşılık p , ergime noktasında sıfıra yaklaşır.

4.) Üzerinde bir yüzey kaplamanın bir lüzucetli (viskoz) aşamadan geçtiği kayma sistemlerinde, sürtünmede bu lüzucetli aşamaya tekabül eden bir sivrilik görülür.

Önemine binaen temas halindeki katlmin sıcaklığı üzerinde biraz daha eğleneceğiz. Şimdi sürtüşen cisimlerin plastik teması sırasında dış statik sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişmesine bir kez daha dönelim.

Sıcaklığın artması, sürtünme katsayısının hem moleküler hem de mekanik bileşeninde değişmeler hasıl eder. Moleküler bileşenin değişmesinin tabiatı, kaymaya mukavemetin özgül kuvvetin, yani sürtüşen parçaların yüzey arasında t_n teğetsel gerilmenin değişmesi ile temasta ortalama dikey gerilmenin değişmesiyle saptanır. Yukarda sözü edildiği gibi bir üçüncü cisim kavramı kullanılarak yüzey arasında teğetsel gerilmenin işbu üçüncü cismin viskozitesinden ileri gelip sıcaklık artışıyla azaldığı ifade edilebilir:

$$\tau_n = \tau_{no} e^{-\gamma \Delta \theta}$$

Burada Y = sıcaklık katsayısı, t_{no} = belli bir sabit referans sıcaklığında t_n in değeri ve γ $\Delta \theta$ da, sıcaklık değişmesidir.

Plastik temas sırasında ortalama dikey gerilme, sıcaklık değişmesine bağlı olarak aşağıdaki gibi değişen Brinell sertliğine eşittir :

$$HB = HB_0 e^{-\alpha \Delta \theta}$$

Burada HB_o = bir referans sıcaklığında sertlik, a = sıcaklık katsayısıdır. a ve Y nın değerleri, aşağıda betimlenen yöntemlerle aynı şekilde deneysel olarak bulunurlar.

Dış statik sürtünme katsayısının moleküler bileşeni, aşağıdaki münasebete uygun olarak bileşmenin çalışma sıcaklığı ile değişir :

$$f_{ml} = \tau_{no}/HB_o e^{(\alpha-\gamma)\Delta\theta} = f_{mlo} e^{(\alpha-\gamma)\Delta\theta}$$

Burada f_{mlo} , bir referans sıcaklığında moleküler bileşendir.

Sıcaklık değişmesine bağlı olarak moleküler komponent (bileşen) azalabilir, artabilir ya da değişmez kalabilir.

Deneysel verilere göre havada normal çalışma koşulları altında, kapalı sürtünmeli birleşmelerde (karşılıklı bindirme katsayısı bire eşittir) dış sürtünme

$$-150^\circ\text{C} \leq \theta \leq (0,1 \text{ ilâ } 0,3) \theta_f$$

sıcaklıkları arasında yer alır ki O_f , ergime sıcaklığıdır. Birden çok aşağı bindirme katsayılı birleşmelerde dış sürtünme

$$-40^\circ\text{C} \leq \theta \leq (0,2 \text{ ilâ } 0,3) \theta_f$$

sıcaklık aralığında yer alır. $\theta = (0,2 \text{ ilâ } 0,3) \theta_f$ sıcaklıklarda dış sürtünme durur şöyle ki temas bölgelerinde sürtüşen cisimlerin şiddetli bir sarması (yapışması) vaki olur.

Tahliller, artan sıcaklıkla yüzey topografisi değişmesinin sürtünme katsayısının mekanik bileşeni üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceğini gösteriyor. Bu takdirde değişen sıcaklık mekanik bileşeni, malzeme sertliğinin değişmesi yoluyla etkileyecektir. Artan sıcaklıkla sertlik azalması çıkıntılarının daha çok nüfuz etmelerini ve dolayısıyla mekanik bileşenin artmasını sonuçlandırır.

$$f_{mc} = f_{mco} e^{\alpha\Delta\theta/2v}$$

Çalışma sıcaklığına bağlı olarak dış statik sürtünme katsayısının toplam değeri

$$f = f_{mlo} e^{\delta\Delta\theta} + f_{mco} e^{\alpha\Delta\theta/2v} \text{ olacaktır.}$$

Böylece, kaide olarak artan çalışma sıcaklığı ile dış statik sürtünme sayısının moleküler bileşeni azalır, mekanik bileşeni artar. Genel olarak, $f = \psi(\theta)$ fonksiyonu, dış sürtünme bölgesine tekabül eden aralık içinde birleşmelerin çalışma sıcaklığının değişmesi sırasında bir minimumdan geçer.

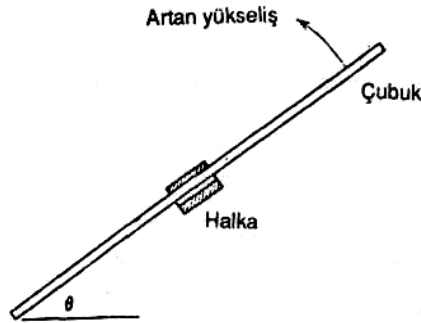
Yapışma - kayma

Bir cismin bir diğeri üzerinde devamlı bir çekme kuvvetiyle kaymasının bazen sabit ya da buna yakın, başka durumlarda da geniş ölçüde dalgalanan hızlarda vaki olduğu her zaman gözlenir. Birçok pratik kayma sistemlerinde kayma hızının bu dalgalanmaları ciddi sıkıntı yaratır ve bunların yok edilmeleri, veya hiç değilse azaltılmaları için normal olarak önlemler alınır. Kayma sistemlerinin hareketinin tabiatını saptayan faktörlerin tetkiki sadece bir pratik olay olarak değil, aynı zamanda kayma süreçlerinin aslı karakteristiklerine ışık tutmak bakımından ilginç olmaktadır.

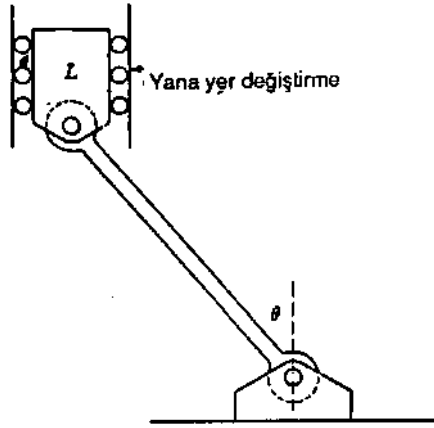
Tüm yapışma-kayma süreçleri, sürtünme kuvvetinin bazı başka değişkenin fonksiyonu olarak sabit kalmadığı olgusundan ileri gelmektedir. Bu başka değişken mesafe, zaman, veya hız olabilir ve bunların her biri bir titreşim şekli oluşturur.

A.II.1.9 Sürtünmenin ölçümü

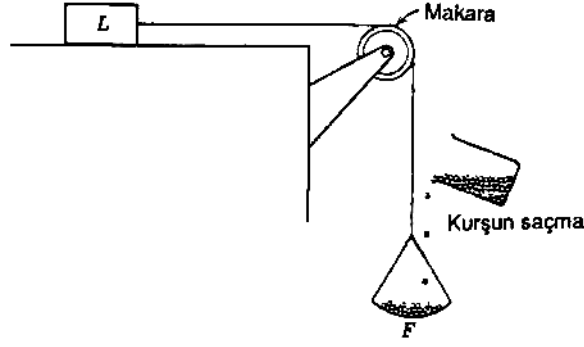
Ölçülecek en basit parametre, kaymayı başlatmak için gerekli kuvvet olup bu, kolaylıkla statik sürtünme katsayısına dönüştürülebilir. Yukarı kalkan düzlem tertibinde dikey kuvvetler değişir ve 9 sürtünme açısı doğruca ölçülür (Şek. 66 ve 67); ama yükü sabit tutup çeken kuvveti kayma başlayana kadar artırmak da çok basittir (Şek .68 ve 69). Bu türden ölçümler çok kullanılır; bunların başlıca sınırlamaları darbe yüklemesini önlemenin ve yapışma süresinin denetim altında tutulmasının güçlüğüdür.



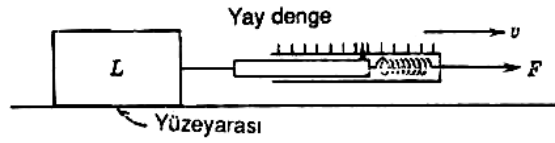
Şek. 66.- Bir yukarı kalkan düzlem aleti şekli (vakumda deneyler için faydalı)



Şek.67.- Yukarı kalkan düzlemin bir uygulaması (düz zeminlerin kayganlığını ölçmek için).

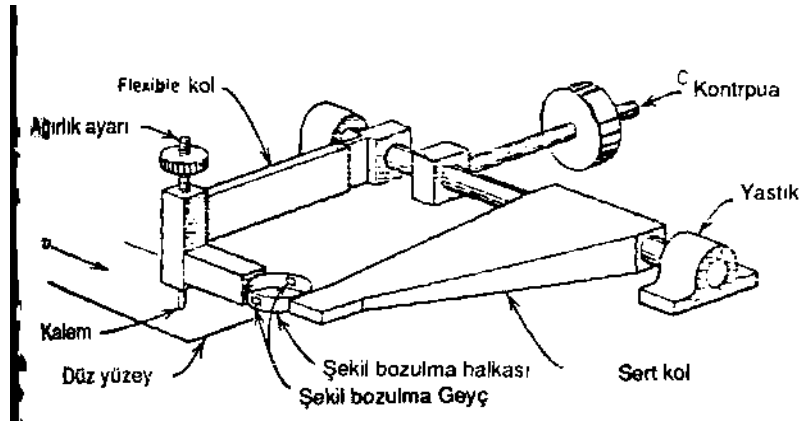


Şek. 68.- Statik sürtünmeyi ölçmek için ağırlık-makara yöntemi



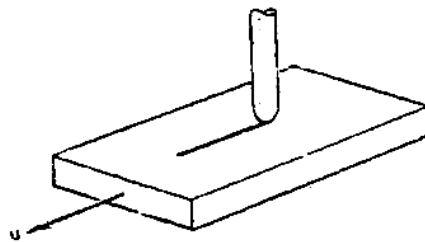
Şek. 69.- Statik ve kinetik sürtünmeyi ölçmenin basit yay denge yöntemi. Çok basit ve değişik, örneğin düz zeminlerin kayganlığı ölçümlerine uygulanabilir.

Kayma sırasında sürtünmeyi ölçmek için mutad olarak bir dinamometre yöntemi kullanılır; bunda bir cisim hareket halinde bir yüzeye bastırıldığında onu hareketsiz tutmak için gerekli kuvvet takip edilir (Şek.70).

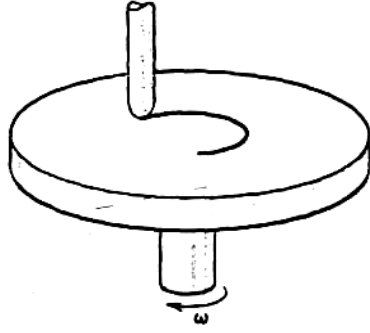


Şek 70.- Bir dinamometre ile sürtünme ölçümü. Sürtünme kuvveti, şekil bozulma halkasını bastırır. Bu, belki de laboratuarda sürtünmenin ölçülmesi için her şeye uyan en iyi yoldur.

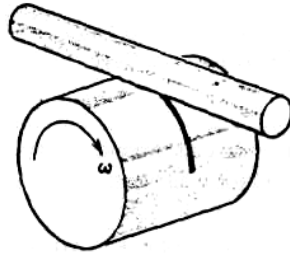
Normal olarak sürtünme kuvveti sürekli olarak kaydedilir. Bu türden ya da buna benzer bir tertip, intikal eden düzlem üzerinde bir pim (şek. 71), bir döner düzlem üzerinde bir pim (şek. 72), veya bir silindir üzerinde bir başka silindirin (şek. 73) geometrileri için kullanılır.



Şek. 71.- İntikal eden geometri (genellikle tek paso)



Şek. 72.- Döner geometri (genellikle çok paso)

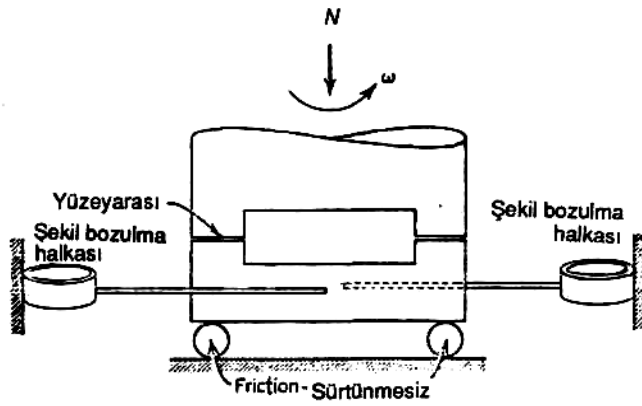


Şek.73- Bir başka silindire temas eden silindir

Bütün bu yöntemlerde temasın, kayına dar bir yol üzerinde vaki olacak gibi yerleştirilmiş olduğuna dikkat edilecektir. Fiilen, birçok durumda yol, pimin ucu konikleştirilerek ya da yuvarlatılarak daha da daraltılmıştır şöyle ki görünür ve gerçek temas alanları eşit olurlar. Bu, örneğin mikroskop tetkiki için, yüzey üzerinde alanların yerini saptamayı kolaylaştırır ve bu yolla elde edilen sürtünme katsayıları daha az yoğunlaştırılmış yüklemeler için, sürtünme kuvveti görünür temas alanlarından bağımsız olduğu sürece, geçerli olacaktır.

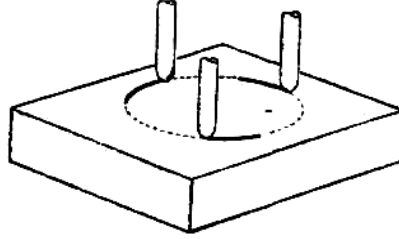
Fiilî yataklama uygulamalarında başat olanlara daha yakın deneylerde çoğu kez, uçları bir başka silindirin uçlarıyla temas eden bir silindirin geometrisi seçilir.

Teması az çok sınırlandırmak ve böylece de sürtünme çift kuvveti ölçümlerini sürtünme katsayılarına dönüştürülebilir hale getirmek için silindirden birinin ya da her ikisinin ortası oyulur (Şek. 74).



Şek. 74.- Sürtünme ölçümü için eşmerkezli silindir yöntemi

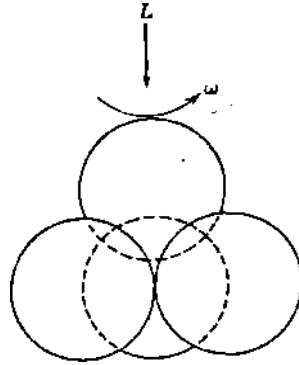
Bu tertiple Şek. 71' de görülenin bir karıŐımı, bir düzlem üzerinde 3 pim geometrisinde görülür (Şek. 75). Bu son tertibe az çok eş biri 4 bilye (küre) aleti (Şek. 76) olup bundan bir rulman bilyesi üç sabit bilye üzerinde döner.



Şek. 75.- Bir düzlem üzerinde üç pim geometrisi

Deneylerin çoğunda sürtünme katsayısı, yukarda irdelemiŐ olduğumuz deĐiŐkenlerin biri ya da diğerinin fonksiyonu olarak tetkik edilir. Özetle,

Sürtünmenin kayma süresiyle değişmesi. Bu, genellikle bazı yüzey kaplamalarının aŐınması ya da kayma sisteminde mevcut bazı malzemenin bozulmasının incelenmesini teşkil eder. Alternatif olarak, sürtünme kuvveti dalgalanmalarını ölçerek birleşmelerin niteliklerini incelemeyi deneyebiliriz, (bkz. s.65, "Yüzey etkileŐimleri geometrisinin lmleri").



Şek. 76.-  bilye üzerinde bilye geometrisi. Alttaki üç tanesi sabit tutulur. Bunun bir değişik Şekli yuvarlanma sürtünmesini tetkik için kullanılır ki bunda alttaki  bilye bir silindirik "kap" içinde dönebilirler.

Sürtünme katsayısının yükle değişmesi. Sürtünmenin ilk nicel kanunundan herhangi bir sapma ilginç olup katsayının yükün artışıyla artması halinde ciddi kayma davranışı veya hatta sarma (yapışma) kaçınılmaz olabilir.

Sürtünmenin kayma hızı ile değişmesi. ılımlı kayma hızlarında sürtünme- hız eğrisinin meylini ölçerek yapışma - kaymaya eğilimi tetkik etmek mümkündür. Yüksek hızlarda yüksek yüzey arası sıcaklığı yumuŐama veya ergimeye neden olur ve ergiyik yağlaması alanına gelinmiŐ olur.

Sürtünmenin sıcaklıkla değişmesi. Sıcaklığın etkisi üzerinde deneyler, yüzeylerin ısıtılmaları için bazı tertipleri gerektirir. Çok yüksek sıcaklıklarda (Yakl. 325 °C in üstünde) fırın (ocak) içinde bir sürtünme aletinin imali gerekir. Sıcaklığın deĐiŐtiĐi koşullarda deneyler yağlayıcıların çözülme noktasını, oksitlerin ve belki de başka filmlerin oluŐmasını gösterip yüksek sıcaklıkta kayma koşulları altında malzemelerin kullanılıŐıĐım saptamaya yarar.

Sürtünmenin vakum derecesiyle değişmesi. Bu deneyler de özel aletleri gerektirip sürtünme teorilerini genişletmede, uzayda kayma uygulamalarında kullanılacak malzeme seçiminde çok faydalı olmaktadır. Dış statik sürtünmeye katsayısının hesaplanması için gerekli unsurların saptanması yön teinleri

Sürtünme katsayısının mekanik bileşeni, birbiri üzerinde kayan çiftten en yumuşağının mekanik karakteristikleri, daha sert olanın yüzey geometrisi ve birleşmede çevre basıncının büyüklüğünden yeterince hassas olmak hesaplanabilir. Sürtüşen katıların karakteristiklerinden moleküler bileşeni hesaplama yöntemleri henüz gelişmemiştir; bu nedenle de bu bileşen, deneysel olarak saptanmaktadır.

Dış sürtünme katsayısının moleküler bileşenini ve aile fi sürtünme parametrelerinin saptanması için bir yöntem. Dış sürtünme katsayısının moleküler bileşeni genellikle

$$f_{ml} = \frac{\tau_n}{p_r} \quad (1)$$

$$\text{veya } f_{ml} = \frac{\tau_n}{p_r} + \beta \quad (2) \text{ ile verilir.}$$

Plastik temasta ($p_r = HB$) moleküler bileşen, deneysel olarak saptanacaktır.

Elastik temas sırasında, p_r nin değeri değişkendir. x_o ve P sürtünme parametreleri, dikey temas gerilmesinden bağımsız olup böylece moleküler bileşenin hesabında kullanılabilir. x_o ile p_r nin değerleri bilinince, hesap aşağıdaki formüllerle yapılır:

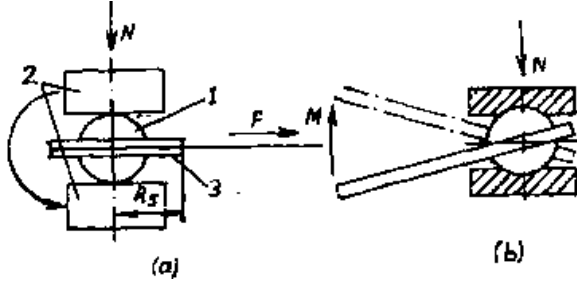
$$f_{ml} = \frac{2.1 \tau_o \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)^{0.8}}{p_c^{0.2}} \frac{1}{\Delta^{0.4}} + \beta$$

veya seyrek temaslar için;

$$f_{ml} = \frac{1.4 \tau_o (1 - \mu^2)^{2/3}}{E^{2/3} p_c^{1/3}} \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^{1/3} + \beta$$

Moleküler bileşenin saptanmasında, aşağıdaki gerekler karşılanacaktır: (1) laboratuvar deney koşulları, sürtüşen parçalı temasında fiilî çalışma koşullarına mümkün olduğunca yaklaşacaktır; (2) ortalama dikey gerilme, laboratuvar modeli ve gerçek üründe aynı olacaktır şöyle ki moleküler bileşen dikey gerilmeye tabîdir.

En yaygın uygulamada yöntem, işbu gerekleri karşılamakta olup esas itibariyle yüzey tabakalarının deformasyonundan ileri gelen (yani sürtünme kuvvetinin mekanik bileşeni) nispi kaymaya direnmenin yok edilmesi veya ihmal edilebilir bir miktara indirilmesinden ibarettir. /m/ , elde edilen sürtünme kuvvetinin moleküler bileşeninin büyüklüğünden bulunur. Yöntem şöyle uygulanmaktadır (Şek. 77):



Şek. 77.- Bir küresel (a) ve bir silindirik engeli saptayıcı ("iğne") aracılığıyla in saptanması

Gerçek küresel şekilde bir 1 iz bırakıcı iki düz ve paralel blok (2) arasında sıkıştırılır, bu, simetri eksenini etrafında çevrilir ve deveren için gerekli sürtünme kuvveti ölçülür (Şek. 77 a) . iz bırakıcıyı bir 3 yuvasına oturtmak münasip olur. Düz bloklar, numunelerden Brinell sertlik deneyleri için beklenenlere göre seçilir; bunlar da araştırılacak malzemeler ve iz bırakıcının çapına bağlıdır. İz bırakıcılar, deney için özel olarak yapılır veya, mümkün olduğu zaman, bilyeli rulmanlardan seçilir. Blokların çalışan yüzeyi, mümkün olduğu zaman, bilyeli rulmanlar seçilir. Blokların çalışan yüzeyi, malzemenin Brinell sertliğine göre işlenir. $HB < 35$ ise bloklar bir ince eğe ile eğelenebilir. $HB > 35$ olması halinde blokların yüzeyi parlatılacaktır.

Daha sert bir malzemeden yapılmış küresel iz bırakıcının yüzeyi yüksek pürüzlülük klasından (12. veya 13. klas - GOST 2789) olacaktır. Dönmeye mukavemet kuvveti böylece pratik olarak (% 0.5 yaklaşıklıkla) sürtünme kuvvetinin moleküler bileşenine eşit olur. Uygulanan yük, iz çapının $0,064 < d/D < 0,6$ olmasını sağlayacak gibi olacaktır. İz çaplarının bu aralıkları içinde ortalama temas gerilmesinin değişmez ve Brinell sertliğine eşit ve de

$$N = 2 \pi R_{sp} h HB \quad (5)$$

ortalama temas gerilmesinin değişmez olduğu göz önüne alındığında, plastik temas koşullarında gerekli yükler aralığında değişecektir; burada R_{sp} , küresel iğnenin yarıçapıdır.

$$0,126 \times 10^{-3} R_{sp}^2 HB \leq N \leq 1,26 R_{sp}^2 HB \quad (6)$$

İz bırakıcıyı simetri eksenini etrafında düz blokların çalışan yüzeylerine dikey olarak döndürmek için gerekli ölçülmüş kuvvetin hasıl ettiği teğetsel gerilme,

$$\tau_n = 3 FR_s / 4 \pi r_{im}^3 \quad (7) \text{ ile verilir. Keza sürtünme}$$

katsayısının moleküler bileşeni de (1 formülüne bkz.)

$$f_{ml} = 3 FR_s / 4N r_{im} \quad (8) \text{ olur. Burada } R_s = \text{yuvanın}$$

yarıçapı, r_{im} = izin yarıçapıdır.

İzin çapı, Brinell sertlik deneyinde benzer ölçümlerde kullanılan büyüteç ya da özel komparatör veya mikroskoplarla ölçülebilir.

% 0,15 karbonlu bir çelikten küresel iz bırakıcı ile temasta çeşitli malzemelerin sürtünme katsayısının moleküler bileşiminin değerleri, Tablo 31' de verilmiştir.

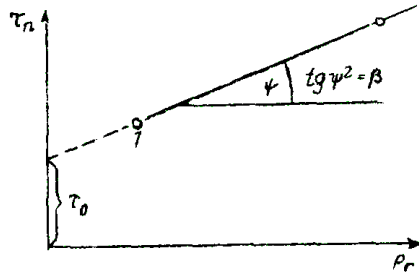
Bazı durumlarda f_{ml} küresel yerine bir silindirik iz bırakıcı kullanılarak (Şek.77b)

yaklaşık olarak bulunabilir. Uygulanan dikey yük, ortalama temas basınçlarının HB ye eşit olmasını sağlayacak gibi seçilecektir. Bir düz numune ile bir silindir arasındaki yüzey arasında teğetsel gerilme ve keza sürtünme katsayısının moleküler bileşeni formulleriyle hesaplanır.

$$\tau_n = \frac{F_o R_o}{2 N R_{cl}} HB \quad ; \quad f_{ml} = \frac{F_o R_o}{2 N R_{cl}}$$

Bu yöntemin sakıncası, numunelerle silindir arasında muhtemel hizadan kaçıklıktan ileri gelen daha aşağı hassasiyettir.

\hat{i}_o ve f_i sürtünme parametreleri, çeşitli desteklere uygulanan sürtüşen deney malzemelerinde münasip şekilde bulunabilir. Ortalama dikey gerilmenin en az iki farklı büyüklüğü için bir ve aynı birbiri üzerinde kayan malzeme çiftinde x_n in değerini saptayıp ve şek. 78 görüldüğü gibi $x_n = y / (p_r)$ grafiğini çizerek r_o ve f_i mn değerleri bulunur.



Şek.78- Pr nin fonksiyonu olarak Tn ve β

Tablo 31.- Sürtünme katsayısının moleküler bileşeninin ve τ_o ile β sürtünme parametrelerinin değeri

Malzeme	$HB, \text{kgf/mm}^2$	f_{ml}	$\tau_o, \text{kgf/mm}^2$	β
Metallar				
Kurşun	3.3	0.140	0.274	0.057
	2.8	0.155	-	-
Gümüş Alüminyum	55	0.096	0.77	0.081
	23	0.124	-	-
Bakır	28.5	0.139	1.68	0.080
	40.0	0.125	1.8	
	52.0	0.115	1.82	
	85.0	0.100	1.70	
Nikel	70.0	0.123	0.49	0.116
	105.0	0.130	1.47	
	180.0	0.095	3.78	

Armco çeliği	70.0	0.139	-	-
	130.0	0.097	-	-
	65.0	0.160	-	-
Vanadium Tantalum	110.0	0.103	-	-
	78.0	0.115	2.42	0.084
Molybden	110.0	0.105	1.87	0.088
	186.0	0.095	2.79	0.088
	140.0	0.128	-	-
Tungsten Niobium Rhenium	285.0	0.082	-	-
	32.0	0.142	0.896	0.144
	105.0	0.095	-	-
Krom	200.0	0.095	-	-
	100.0	0.135	1.50	0.120
Kadmium Çinko Magnesium Titanium Zirconium	23.0	0.096	0.943	0.055
	33.0	0.088	-	-
	44.0	0.082	-	-
	128.0	0.100	2.82	0.078
	190.0	0.085	-	-
	74.0	0.121	-	-
Kobalt	130.0	0.092	-	-
	83.5	0.082	-	-
Antimuan Bismüt Kalay	27.0	0.127	0.73	0.100
	7.70	0.175	0.454	0.116
	4.40	0.170	0.449	0.068
İndium	0.80	0.200	0.107	0.066
	0.60	0.260	-	-

A.II.1.10 Sürtünme katsayısının hesabı için yöntem

Dış sürtünme katsayısının mekanik komponenti (bileşeni), bir kayan çiftin fiilî çalışma koşulları için hesaplanabilir. Moleküler bileşen, deneysel olarak elde edilmiş X_a ve f_i sürtünme parametrelerinin değerlerinden hesaplanır. Sürtünme katsayısını hesap etmeden önce, temas alanlarında hangi tipten bir deformasyonun vaki olduğu ve belli bir çevre basıncında hangi tipten bir temasın (yoğun veya seyrek) yer aldığı hakkında kesin bir fikre sahip olunması gerekir. Burada, itibarî olarak direkt ve ters diye söz edeceğimiz iki tür sorunla karşılaşılır. Direkt (doğruca) sorun, dış sürtünme katsayısını verilen çevre basıncı değerleri, sürtüşen parçaların mekanik nitelikleri ve sürtünme katsayısının moleküler bileşeni veya T_o ve f_i sürtünme parametreleri ile saptamaya dairedir.

Buna karşılık ters sorun, belirtilmiş sürtünme katsayısı ve çalışma koşullarının seçimindeki amaç (yani sürtüşen parçalar için malzemeler ve yağlayıcının tipi; bunlar, v_0 ve f_i sürtünme parametrelerinden saptanmış moleküler bileşen tarafından seçilmişlerdir); keza seçilen malzemeler için verilmiş sürtünme katsayısını sağlayan yüzey pürüzlülüğü ve çevre basınçları seçilir.

Gerekli hesapların aşağıdaki sıraya göre yapılması önerilir.

Direkt sorun (1) Sürtüşen parçaların mekanik niteliklerinin uygun referans kaynaklarından seçimi ya da bunların deneysel olarak bulunması. (2) Tablo 5 (kaba tahminler için) ya da

yukarda açıklanmış yöntemler kullanılarak yüzey pürüzlülük parametrelerinin saptanması. (3) Tablo 31' de t_o ve f_i parametrelerinden bunların saptanması yöntemleri kullanılarak x_n ile l_m in değerleri saptanacak veya (4) Birleşmenin tasarımına bağlı olarak Herz formülünden çevre basıncı saptanacak . (5)

$$\frac{1.4}{\Delta^2} \cdot \frac{HB^5 (1 - \mu^2)^4}{E^4} \quad (1) \quad \text{ile}$$

$$p_c \geq 14.5 \frac{1}{\Delta^2} \frac{HB^5 (1 - \mu^5)^4}{E^4} \quad (2)$$

formülleri kullanılarak temas alanlarında hangi tip deformasyonun yer alacağı saptanacak. (6)

$$p_c \geq 0.125 HB / \Delta^2 (1 - 6 \tau_n / HB)^2 \quad (3)$$

formülünden birleşmede dış sürtünme şartlanılın vaki olup olmadığı bulunacak. (7) Seyrek temas için

$$p_{cs} \geq 6 \times 10^{-3} \Delta^{1/2} E / (1 - \mu^2) \quad \text{ve} \quad (4)$$

Seyrek plastik temas için;

$$\frac{14,5}{\Delta^2} \left[\frac{HB (1 - \mu^2)}{E} \right]^4 \leq \frac{p_c}{HB} \leq \frac{0,5}{(vB^{1/v})^{\frac{v}{v-1}}} \quad (5)$$

formüllerinden temasın yoğun ya da seyrek olduğu saptanacak. (8) Uygun formül kullanılarak, sürtünme katsayısı hesaplanacak.

Ters sorun. (1) Tablo 31' den yaklaşık olarak sürtünme katsayısının moleküler bileşeni ile birleşmenin çalışma koşullarına uyacak malzemeler seçilecek.

(2) Birleşme tasarım karakteristiklerinden ve seçilen malzemelerden hareketle, Hertz formüllerinden çevre basıncı saptanacak.

(3). (1) ve (2) formülleri kullanılarak temas alanlarında deformasyon tipi saptanacak.

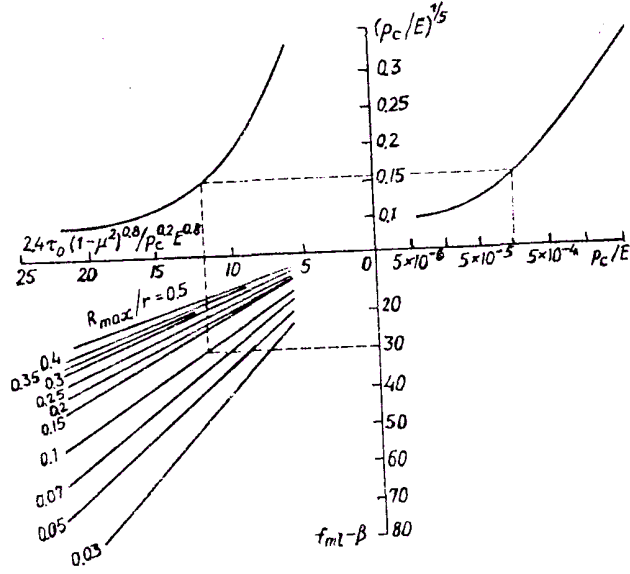
(4). (4) ve (5) formülleri kullanılarak temasın yoğun ya da seyrek olduğu saptanacak.

(5). Elde edilmiş sonuçlara bağlı olarak yüzey pürüzlülük parametreleri ve çevre basınçları, yerleşmiş temas etkileşim sorunlarını aşmayacak ve istenen sürtünme katsayısı değerine varıldığından emin olunacak şekilde, değiştirilecekler.

(6) Böylece türemiş veriler ışığında çevre basıncı değeri tahkik edilecek.

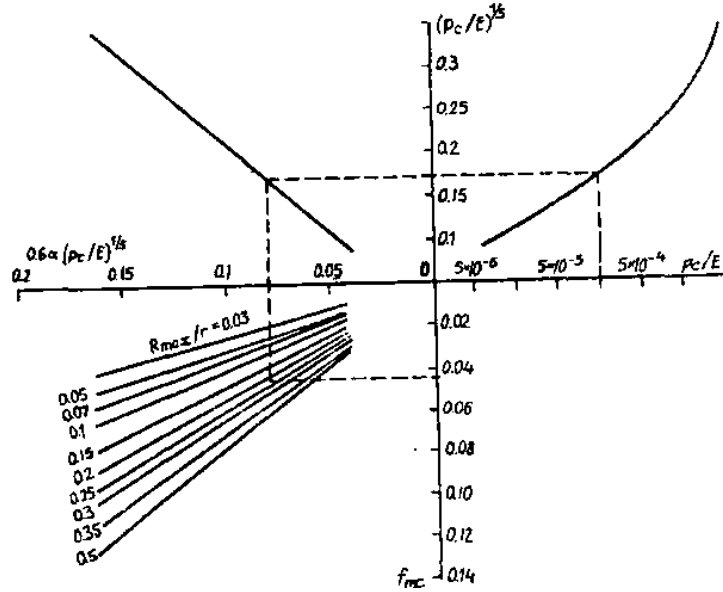
(7) Çapraşık parametrenin elde edilmiş değerlerinden, gerekli yüzey pürüzlülük klasını sağlayacak (talaş kaldırmalı) işleme tipi seçilecek.

Şek. 79 ilâ 83 her temas tipi için, yaklaşık olarak sürtünme katsayısını saptamak



Şek.79.- Sürtünme katsayılarının moleküler bileşenini saptamak için nomogram üzere çizilmiş nomogramları verir.

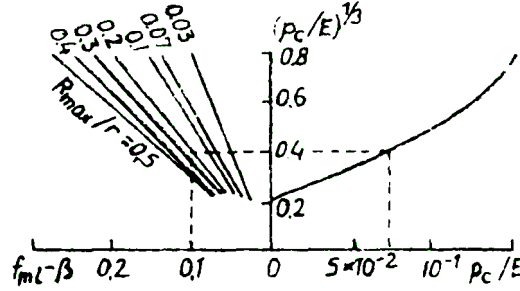
$\nu = 2$ ve $l; = 2$ de bilinen $xJE = 0,1$ değerlerinde elastik seyrek temas için moleküler bileşeni saptamak üzere tasarlanmış nomogram şek. 79 da görülür. p_L/E nin belli değerlerinde, bir muayyen yüzey pürüzlülüğü için $f_a - l?$ ya, kesik çizgilerle gösterilen sırada varılır. Böylece h ım bilinen değerinde sürtünme katsayısının moleküler bileşeni bulunur.



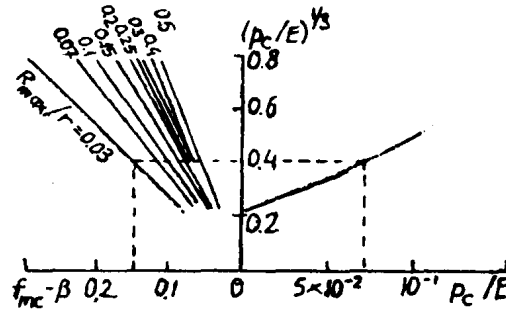
Şek. 80.- Sürtünme katsayısının mekanik bileşenini saptamak için nomogram.

Dış sürtünme katsayısının mekanik bileşenini hesaplamak için nomogram, şek. 80' de temsil edilmiştir. Burada kesik çizgilerin gösterdikleri sıra, $\nu = 2$, $b = 2$ ve $OL = 1$ de bir itibarî mekanik bileşeni saptamada takip edilir; bu bileşen histeresis kaybı faktörü ile çarpılarak, kullanılan malzeme için f_{mc} elde edilir.

Elastik yoğun temasta moleküler ve mekanik bileşiklerin değerlerini bulmak için şek. 81 ve 82' de verilmiş nomogramlar kullanılır. Gerekli değerlerin bulunması için sıra, aralıklı çizgilerle gösterilmiştir.

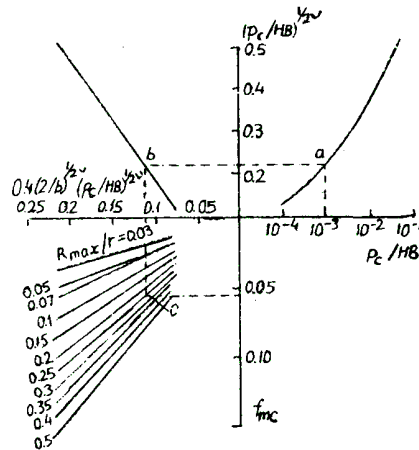


Şek. 81.- Yoğun temas sırasında sürtünme katsayısının moleküler bileşenini saptamak için nomogram



Şek. 82.- Yoğun temas sırasında sürtünme katsayısının mekanik bileşenini saptamak için nomogram

Şek. 83, $\nu = 2$, $b = 2$ de P_c/HB nin verilmiş bir değeri için sürtünme katsayısının f_{mc} bileşenini bulmak üzere tasarlanmış nomogramı gösterir. Burada da işlemlerin sırası kesik çizgilerle gösterilmiştir. Toplam sürtünme katsayısı, mekanik ve moleküler bileşenleri toplayarak elde edilir ki bu sonuncusu, verilen birleşmenin çalışma koşulları iyice dikkate alınarak deneysel olarak saptanmış olacaktır



Şek. 83.- $\nu = 2$ $t = 2$ de sürtünme katsayısının mekanik bileşenini saptamak için nomogram

Örnek 1. $p = 4 \text{ kgf/cm}^2$ nominal basınçta takım tezgâhı gaydında dış sürtünme katsayısının hesap edilmesi. Hesap, yukarıda verilmiş olan sıraya göre yapılır. Gayd $HB 250$ sertliğinde bir çelikten olup 9. klas yüzey pürüzlülüğüne taşlanmıştır. Gayd boyunca hareket

eden parça aşağıdaki mekanik karakteristikleri haiz fluoroplastikten yapılmıştır : $E = 10^4$ kgf/cm²; $a = 0,15$; $HB = 3,1$ ve $\nu = 0,5$

Yüzey pürüzlülük parametreleri, çelik flüoroplastikten çok daha sert olduğundan, gayd için belirtilmiş olacaktır.

Tablo 6 ve T den $A = 2,6 \times 10^{-3}$; $V = 1,6$; $b = 2,3$ ve $R_{max}lr = 0,004$ değerlerini buluyoruz. Çalışma koşullarına (havada sürtüşme) göre sürtünme sabitelerini Tablo 31' den seçiyoruz. Cetveldeki verilerin çalışma koşullarına uymamaları halinde sürtünme sabiteleri yukarıda betimlenmiş yöntemlerle saptanacaktır. Kayan parçalar, yüzey dalgalılığından etkilenmiş temas alanını haizdir Dalgalılığa göre

$$p_c = kE^{0,8} (H_b/R_b)^{0,4} \cdot p_a^{0,2} \quad \text{dir.}$$

Yüzey dalga şeklinin $k = 0,5$ ile küresel olduğu farz edilip yüzey taşlaması için $H_b/R_b = 10^{-5}$ seçilerek

$$p_c = 0,5 (10^4)^{0,8} \cdot (10^{-5})^{0,4} \cdot 4^{0,2} \approx 10,4 \text{ kgf/cm}^2 \quad \text{bulunur.}$$

s. 140' daki (4) formülü kullanılmak temas alanında deformasyon tipini bulalım :

$$\frac{p_c}{HB} = \frac{2,4^{\frac{2\nu+1}{2}} \nu (\nu - 1) k_1 \left[\frac{HB(1 - \mu^2)}{E} \right]^{2\nu} \left(\frac{1}{\Delta} \right)^\nu}{5} =$$

$$\frac{2,4^{2 \cdot 1} \times 1,6 \times 0,6 \times 0,85 \left[2,4 \times 10^{-2} \right]^{3,2} \left(\frac{10^3}{2,6} \right)^{1,6}}{5} = 9 \times 10^{-2}$$

Böylece, elastikten plastik şekil değiştirmeye intikale tekabül eden çevre basıncı, yani $p_c = 28$ kgf/cm², birleşmede fiilî p_r yi aşacaktır. B itibarla temas bölgesinde elastik şekil değiştirmeler yer alacaktır. Temas yoğunluğunun miktarı, s. 140' daki (1) fomülüyle saptanır:

$$p_c = \frac{8 \times 10^{-2} \Delta^{1/2} E}{\left(b^{1/\nu} \nu \right)^{\frac{2\nu+1}{2(\nu-1)}} (1 - \mu^2)} = \frac{8 \times 10^{-2}}{\left(2,3^{0,6} \times 1,6 \right)^{3,5}} \times \left(2,6 \times 10^{-3} \right)^{1/2} \frac{10^4}{0,75} \approx 2 \text{ kgf/cm}^2$$

Birleşme elastik yoğun temas halinde çalışacaktır; buna göre sürtünme katsayısı;

$$f = \frac{1,4 \tau_o (1 - \mu^2)^{2/3}}{E^{2/3} \cdot p_c^{1/3}} \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^{1/3} + \beta + 0,35 \alpha_f p_c^{1/3} (1 - \mu^2)^{1/3} \frac{R_{max}^{1/3}}{r^{1/3}} =$$

$$\frac{1,4 \times 0,032 \times 0,75^{0,67}}{10^{8/3} \times 10,4^{1/3}} + 0,02 + \frac{0,35 \times 2,5 \times 0,15 \times 10,4^{1/3} \times 0,75^{1/3}}{10^{4/3}} \approx 0,044$$

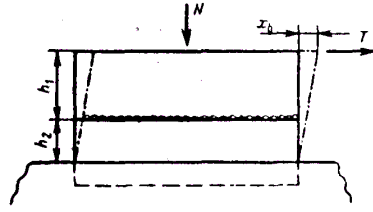
Yer değiştirme başlangıcı

Dış statik sürtünme, başlangıç yer değiştirme alanında vaki olur. Yer değiştirmenin başlangıcı, sürtüşen katların, sükûnetten kayma sürtünmesinin başladığı ana kadar küçük göreceli yer değiştirme olgusudur.

a_T^b , sürtüşen parçaların kitle deformasyonundan hasil olan başlangıç yer değiştirmesi ile a_T^c , temas başlangıç yer değiştirmesi masında ayırılır. Temas başlangıç yer değiştirmesi, yer değiştirmenin başladığı anda katı cisimlerin temas alanı üzerindeki gerilme koşulunun değişmesinden hasil olup temas alanında Şekil değiştirmenin tipine bağlı olur. Böylece toplam başlangıç yer değiştirmesi

$$a_T = a_T^b + a_T^c \quad (1) \text{ olur.}$$

Nispi kaymayı meydana getirmek için gerekli kuvvetin etkisi altında katuların kitle Şekil değiştirmesinden ileri gelen başlangıç yer değiştirmesi, saptandığı noktaya göre değişen bir değişken niceliktir.



$$a_T^b = \frac{\tau}{G_1} h_1 + \frac{\tau}{G_2} h_2 \quad (2)$$

Büyüküğü formülü ile hesaplanır; burada h_1 ve h_2 = sürtüşen cisimlerin tespit edilmiş oldukları kesitten a^h λm ölçüldüğü kesite mesafeler (Şek. 84); G_1 ile G_2 , birinci ve ikinci cismin makaslamaya elastikiyet modülü ve T da, kitle makaslama gerilmeleridir.

Elastik Şekil değiştirme sırasında temas başlangıç yer değiştirmesi, kayma yönünde bir kuvvetin uygulanması halinde temas bölgesinde artan kaymadan ileri gelir.

Temas eden cisimlerin belli kalınlıkta birer levha olduklarını farz edelim. Elastik temas sırasında, temas yüzey arasına dikey bir basma kuvveti, iki alanın ortaya çıkmasını sonuçlandırır, p' ü aşan bir yarıçapı haiz bir alan, yükün uygulaması üzerine kaymasıyla nitelenir; yarıçapı p' den küçük olan ikinci alanda, kayma vaki olmaz.

$$p' = r \left(1 - \frac{T_i}{f N_i} \right)$$

(3) olup T_1 teğetsel çekme kuvvetlidir.

Artan T ile, kayma alanı da birlikte artan ve $T_i = f N_i$ de, p' nün değeri sıfıra eşit olacaktır, yani kayma, tüm temas alanı üzerinde vaki olacaktır. Sonuç içerisinde çıkıntılar

$$a_T^c = \frac{(2 - \mu)(1 + \mu)f_i h}{1 - \mu^2}$$

kadar teğetsel olarak yer değiştirir.

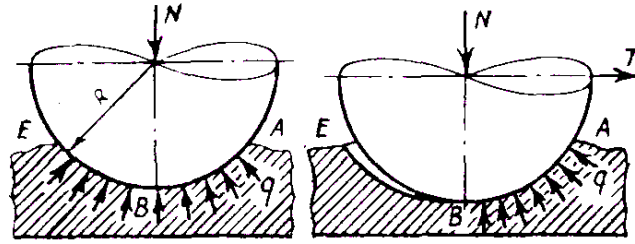
Temas eden yüzeylerin başlangıç yer değiştirmesi, en yüksek çıkıntıda a_T^c ye eşit olacaktır. O halde bu durumda temas başlangıç yer değiştirmesi yaklaşma miktarına ve en yüksek çıkıntıda sürtünme katsayısına bağlı olacak ki bu da, bulunmasını güçleştirir. Mamafih, iyi bir yaklaşıklıkla Jf_{max} in, ortalama sürtünme katsayısı olan/e eşit olduğu farz edilebilir.

Plastik temas sırasında, temas alanında gerilme koşulu değişecektir şöyle ki ye değiştirme anında malzeme, çıkıntılar tarafından "sürülecektir". Sadece dikey yükün etki yapması halinde bir çıkıntı, şek. 85a' da görüldüğü gibi, malzemeye şekil değiştirilecektir. Burada temas alanı

$$\Delta A_{r,st} = 2\pi r h_{i,st} \quad (5) \text{ olacaktır.}$$

Kaymada "sürülme", çıkıntının sadece hareket yönünde cephe kısmından şekil değiştiren malzemeye yüklenmesini sonuçlandırır. Şekil değiştirmiş malzeme ile çıkıntının temas alanı

$$\Delta A_{r,kin} = 2\pi r h_{i,kin} \quad (6) \text{ olur.}$$



Şek. 85.- Sükûnette ve yer değiştirme sırasında çıkıntının teması

Bu itibarla çeşitli yükler tekabül edebilen tamamen eş yaklaşma miktarlarıyla kaymada gerçek temas alanı, sükûnetekinin yarısı kadar olacaktır. (5) denklemini hesaba katıldığında, pürüzlü yüzeyin bir düzgün yüzey üzerinde kayması halinde gerçek temas alanı

$$A_{r,st} = \frac{1}{2} A_c b \varepsilon_{kin}^v \quad (7) \text{ olacaktır.}$$

Sükûnet ve kaymada yaklaşma miktarları arasındaki münasebet, sırasıyla gerçek temas alanları arasındakiine bağlı olacaktır. Temas alanlarında plastik deformasyonlar için

$$A_r = \frac{N}{p_r} \quad (8) \text{ olur.}$$

Bu itibarla sükûnet ve kaymada gerçek temas alanları arasındaki münasebet, sürtüşen cisimler üzerine etki yapan kuvvetlere ve bu koşullarda fiilî gerilmeler arasındaki münasebetlere bağlı olacaktır. Uygun hesap ve deneyler, rheolojik (malzeme deformasyon ve akması bilimine ait) etkilerin ihmal edilebildikleri yerlerde, çeşitli malzeme ve etkileşim için

$$p_{r,st} = p_{r,kin} = p_r \quad (9)$$

olduğunu göstermiştir.

Kayma bileşenlerine, kayma hareketini yaratan dikey ve teğetsel kuvvetler toplamının etki yaptığı olgusu göz önüne alınarak

$$A_{r,kin} = A_{r,st} \sqrt{1 + f^2} \quad (10)$$

Böylece de, yer değiştirme sırasında temas alanının bir keskin azalması, temas eden

parçaların yaklaşmalarını sonuçlandırır ki bu, kayma hareketinin ilk döneminde "sürülme" dolayısıyla temas alanlarının yeniden dağılımından ileri gelir. Gerideki (kayma yönüne göre) çıkıntıda temas alanı A_{rist} 12 den sıfıra azalırken öndeki A_{rist} den A_{rikin} e artar. (10) formülünden sükûnet ve kaymada yaklaşma büyüklükleri çıkarılabilir:

Tek bir iz bırakıcı için;

$$h_{kin} = 2 h_s \sqrt{1 + f^2} \quad (11);$$

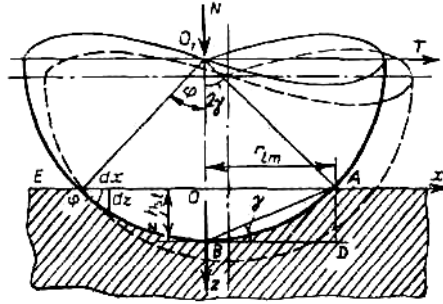
bir pürüzlü ile bir düzgün yüzeyin teması için;

$$h_{kin} = h_s \left(2\sqrt{1 + f^2} \right)^{1/\nu} \quad (12);$$

iki pürüzlü yüzeyin teması için

$$h_{kin} = h_s \left(2\sqrt{1 + f^2} \right)^{1/\nu} \quad (13); \text{ olur.}$$

Yer değiştirme anında yaklaşmanın artışı, temas eden katılarda bir teğetsel yönde değişme ve sürtünme kuvvetinin sıfırdan, kayma sürtünmesi kuvvetine eşit büyüklükte bir maksimuma artışı takip eder. Gerçek temas alanının yeniden dağıtımına tekabül eden, temas düzleminde katıların teğetsel yer değiştirme miktarı, temas başlangıç yer değiştirme olacaktır.



Şek. 86.- Temas başlangıç yer değiştirmesinin şeması

Bir da_t mesafesi kadar yer değiştiren bir çıkıntı, sürtüştüğü yüzeye bir dz derinliğinde dalacaktır (şek. 86). $dz = da_t \tan Y$ ve $\tan Y = z/r$ olduğundan,

$$a_t^c = \int_{hst}^{hkin} \sqrt{\frac{r}{2}} z^{-1/2} dz \quad (14) \text{ elde edilir.}$$

Genel olarak, sükûnette yaklaşma miktarına bağlı olarak temas başlangıç yer değiştirmesi

$$a_t^c = \sqrt{2 r h_s} \left[\left(2\sqrt{1+f^2} \right)^m - 1 \right] \quad (15) \text{ olup burada}$$

m , kayan çiftin tipine bağlı bir katsayıdır. Bir küresel iz bırakıcı ile bir düz yüzeyden ibaret çiftte $m = 1/2$; bir pürüzlü yüzeyin düzgün bir yüzeye temasında $m = 1/2 \nu$ ve temas eden iki pürüzlü yüzeyde $m = 1/2(\nu_1 + \nu_2)$ dir.

(15) denkleminin tahlili, temas başlangıç yer değiştirmesinin göreceli küçük olduğunu gösterir. Plastik temas sırasında maksimum dış sürtünme katsayısının $f = 0,5$ olduğu göz önüne

alınarak a_T^c temas başlangıç yer değiştirme için aşağıdaki değerleri elde ederiz: tek küresel iz bırakıcı için $0,5 r_{st}$; pürüzlü yüzeyle düzgün yüzeyin teması için $0,2 r_{st}$ ve iki pürüzlü yüzey için $0,1 r_{st}$. Araştırmalara göre ortalama temas noktası statik çapı, 2 ilâ $17 \mu m'$ dır. Böylece de temas başlangıç yer değiştirilmesi genellikle son derece küçüktür.