

A.II- SÜRTÜNME

A.II.1 BAŞLICA KAVRAM VE TANIMLAMALAR

Sürtünme, bir katı cismin, dokunduğu bir başkasının yüzeyine göre teğetsel olarak hareket ettiğinde veya böyle bir hareketi hasıl etme girişiminde, bu harekete karşı mevcut olan dirençtir. İnsanoğlunun toplam enerji sarfiyatının çok ciddi bir bölümünü kayma sırasında vaki sürtünme kayıplarının oluşturduğu olgusu, sürtünmenin önemini vurgulamaya yeterli olmaktadır. Bu itibarla herhangi bir türlü sürtünmenin azaltılması, modern teknolojinin son derece önemli bir sorunu olmaktadır.

Bununla birlikte günlük yaşamın birçok sürecinin, etkinlik açısından geniş ölçüde sürtünmeye dayandığı da göz ardı edilmeyecektir. Bu itibarla, gerektiğinde yeterince geniş ölçüde sürtünmenin sağlanması büyük önemde bir görev olmaktadır. Yürümek veya otomobil kullanmak (ilk hareket, durma, viraj alma açısından), cisimleri ellerimizde tutmak gibi basit süreçle içiceyiz ve sürtünmenin çok az olması halinde bunları gerçekleştiremeyiz. Bu sonuncu durumda, koşulların "kaygan" olduğunu söyleriz ve bu, çare bulunması gereken bir sürtünme sorunu haline gelir. Keza çiviler, civata - somunlar ve sair sıkıştırıcı - birleştiriciler gibi mutat tertiplerin işlevinde yüksek sürtünmenin sağlanması gereklidir.

Her ne kadar sözü edilen iki kategori başlıca iki sürtünme gereksinmesini, istenmediğinde sürtünmeyi azaltma ya da gereğinde onu yeterince yüksek düzeyde tutmayı içeriyorsa da yine belli bir önemi haiz bir üçüncü sorun vardır ki o da, dar sınırlar içinde sürtünmeyi sabit tutmaktadır. Buna tipik bir örnek, otomobil frenleri olup bunlar, sürtünme çok az olunca arabayı yeterince çabuk durdurmazlar, fazla yüksek olduğunda da yolculara tatsız bir ileri fırlamayı yaşatırlar. Sürtünmenin denetim altında tutulmasının gerektiği sair uygulamalar, metal haddeleme endüstrisinde veya yine çeşitli türden presizyon tertipleri gibi hassasiyetle denetlenebilir hareketin istendiği yerlerde olur.

Birçok pratik uygulamada oldukça önemli bir dördüncü sorun da, ince sesler, sürekli gürültüler şeklinde beliren, sürtünmenin hasıl ettiği titreşimlerdir. Bunun aksinin istenmesi de, örneğin keman türü çalgılarda vaki olur ki bunlar ancak bu titreşimler sayesinde ses verirler.

Birbirinden çok farklı şeyleri içine alan üç tür sürtünme tefrik edilir:

1. kuru sürtünme; 2. akıcı sürtünme ve 3. yan akıcı, sınır ya da karma sürtünme.

Kuru sürtünmede katı cisimlerin üst yüzeyleri, bir yağlayıcı aracının ara tabakası bulunmaksızın birbirlerine dokunurlar. Burada T yer değiştirme kuvveti N dikey yük ile orantılı olup;

$$T = \mu N \text{ dir.}$$

Dolayısıyla kuru sürtünmenin μ katsayısı, yüklemenin büyüklüğünden bağımsızdır ki bunu ilk kez, daha önce de sözünü etmiş olduğumuz gibi, Coulomb (1779) sapkımın. Ch. Jakob'un (1911) salt temiz, ileri derecede kuru ve gazdan arınmış yüzeyler büyük özenle üzerinde yürüttüğü deneyler bu kanunu doğrulamaktadırlar. Bu deneylere pirinç üstünde pirinç veya çelik

üstünde pirinçte yüzey basıncının 0,(X)9 at' dan 60 at' a yükseltilmesinde, // sürtünme katsayısında hata sınırının dışında bir değişme gözlenmemiştir.

Bir katı cisimle atmosfer arasında sınır yüzeyi, kristal şebekesindeki bağlı katı atomların serbest hareket eden gaz moleküllerine komşu şeklinde telakki edilmeyecektir. Bunların ikisi, bir adsorbe olan hava tabakasıyla ayrılmış olup bu sonuncusu, normal atmosferden fevkalade daha yoğun ve sadece az molekül veya atom tabakası kalınlığında, 10^{-7} ilâ 10^{-6} mm büyüklük (kalınlık) mertebesinde plan bir tabakadır. Bu, katı cisimler arasındaki sürtünmeyi önemli ölçüde etkiler; böylece de bir yağlama tabakası gibi davranır. Çok sayıda deney, adsorbe eden tabakanın mesafesine göre sürtünmenin nasıl arttığını gösterir.

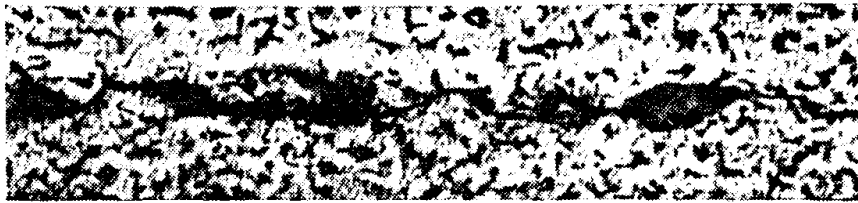
Gerlach (Metallwirtschaft, Bd. 14 - 1935 - s. 1010) bunu çok anlamlı şekilde dile getiriyor: "Camın düz-perdahlı-olduğu, iki çubuğun birbiri üzerinde kolayca yuvalandıkları bilinir. Camın üst yüzeyini, yumuşayana kadar bir Bunsen alevine tabi tutarak yapışık tabakadan kurtardığım zaman çubuklar artık birbirleri üzerinde yuvarlanmaz oluyorlar, hattâ belli bir değere varmamış kuvvetle genelde bunları birbirleri üzerine kımıldatamıyorum; bundan, ben de sizin gibi kuşkulanıp üst yüzeyin mat olduğunu gözlüyorum".

Demir ve çelik yüzeylerde hava ile temasta sadece bir temiz adsorpsiyon tabakası değil, yaklaşık 10 molekül kalınlığında çok ince bir oksit tabakası, yani metalin bir gazla kimyasal bağlantısı bahis konusudur. Teknikte cisimler, daima yağ ya da gres ile temasa gelirler.

Kuru sürtünmeyi moleküler kuvvetler açısından belirtmeye çalışmak, teknik parçaların adsorbe eden tabaka ve üst yüzeylerinin düzensizlikleri nedeniyle, beyhudedir. En parlak yüzeyler, yükseklik farkları birkaç yüz atom boyutunda olan dağ silsileleridir; bu itibarla yaklaşık iki atom boyutunda etki alanını haiz bir moleküler kuvvet burada etkili olamaz. Mamafil aynı konuya, değişik koşullar altında olmak üzere aşağıda yine değineceğiz.

Kuru sürtünmeye ait en eski düşünce, yüzeylerin çok ince dişler gibi yükseklikleri haiz oldukları, bunların birbirleriyle kancalandıkları merkezindedir. Şek. 36 , bir halka ile buna hafif bir fazla kuvvetle yağlamasız olarak geçirilmiş bir birleşme yeri kesitini verir.

Bu. bahis konusu iddiaya iyi bir örnek oluşturur. Daha cince de ifade edilmiş olduğu gibi, cisimlerin birbirleri üzerinde kaymaları halinde düzensizlik (dişlerin)



Şek. 36

elastik olarak şekil değiştirdiklerinde Coulomb kanunu geçerli olmaktadır.

Düz yüklemenin, yumuşak malzemenin herhangi bir çıkıntısının, elastikiyet sınırını aşacak şekilde artması durumunda, geri kalan şekil değiştirme de vaki olur şöyle ki malzeme, yırtılıp (tırmalanıp) acınacaktır (aşınma sürtünmesi). Düzensizlikler farklı yükseklikte ve yüzeyde homogen şekilde dağılmamış olup çıkıntıların bir bölümü elastik, geri kalanı da elastik olmayan

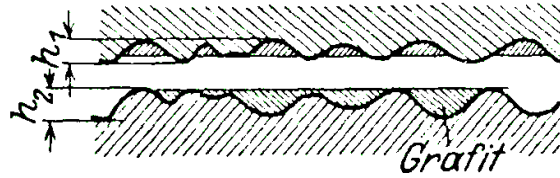
şekil değişimine uğrayacaktır. Bu hal, basıncın tüm düzensizliklerin elastik olmayan şekil değiştirmesini hasıl edecek kadar artmasına dek sürer. Bu nihaî durumda Coulomb kanunu, bittabi daha yüksek bir sürtünme katsayısıyla, yine geçerli olur. Bu madaki durumda ise sürtünme katsayısı, yüzey basıncı ve kayma hızına bağlı olur.

Bu itibarla arada herhangi bir şey bulunmadan birbirine değen yüzeylerde daima aşınma beklenecektir. Plastik cisimlerde (beyaz metal) böylece üst yüzey perdahlanmış olur; sairlerinde, parçalarda daha yüksek bir sürtünme hasıl olur.

Aşınma sorunu etraflıca tetkik edilmiş ve edilmekte olup genellikle aşınma yoluyla ayrılan malzeme miktarı, yüzey koşullan dikkate alınmadan, saptanmaktadır. O ise ki aşınmada sürtünme oksidasyonunun rolünün yanı sıra nötr azotunki çok daha anlamlıdır. Deneyler, yüksek basınç altında kuvvetli sürtünmede bir nitrülenme durumu hasıl olup bu da malzemeyi gevrekleştirip kırılğan kılar. Kuru sürtünme esasta sadece pürüzlü yüzeylerin yapışması halinde önem kazanır ki bu, uzun süre hareketsiz kalmış kayma yataklarda da vaki olur. Örneğin beyaz metal yataklar üzerindeki deneylerde yapışma sürtünmesi katsayısı 0,21 ilâ 0,24 olarak bulunmuşken dökme zarflı Seller yataklarında bu sayı sadece 0,14 olmak saptanmıştır ki bunların her iki malzeme türüne kuvvetlice bağlı oldukları anlaşılıyor.

Yağlama, sürtünmeyi azaltmaktadır. Bunun teorisi üzerine yayılmayacağız. Ancak, gafitin bu yöndeki rolünü belirtmekle ilerde irdeleyeceğimiz parça aşınması konusunda bir başlıca prensibi şimdiden ifade etmiş olacağız.

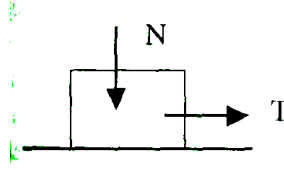
Gerçekten saf kolloidal grafit, Şek. 37' de görüldüğü gibi yüzeyleri "düzgün" hale getirmektedir.



A.II.1.1 Kayma sürtünmesinin nicel kanunları

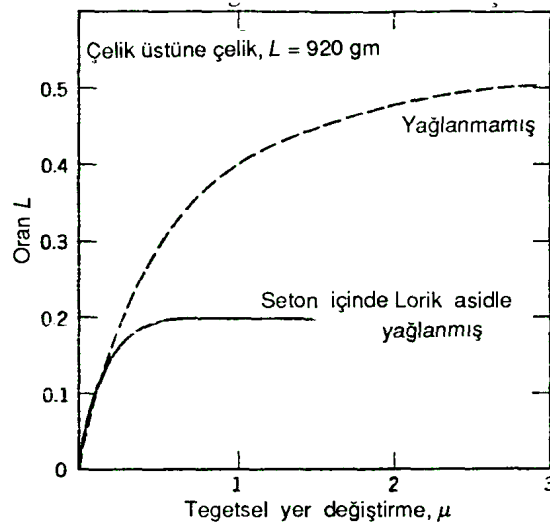
Sürtünme, nicel terimlerle, bir kuvvet olmak ifade edilir: iki temas eden cisimden birinin, öbürünün teğetsel yer değiştirmesine engel olmak için ortaya koyduğu kuvvet. Burada, iki hal masında bir ayırım yapmak zorunluluğu vardır şöyle ki birinde uygulanan kuvvet, hareketi başlatmakta yetersizdir, öbüründe de kaymanın vaki olduğu kuvvet vardır.

Birinci hale özğü olarak, yatay bir düz yüzey üzerine oturmuş bir A' ağırlığını dikkate alabiliriz (Şek. 38). Bir küçük T kuvveti uygulandığında, kaymanın vaki olmadığı görülür. Bu durumda (New ton' un Bilinci kanunu gereğince), yüzey arasında sürtünme kuvvetinin tam olarak T ye eğit ve buna karşıt olması gerektiği açıktır.



Şek. 38.- Bir yatay yüzey üzerinde bir yükün şematik gösterilişi. Bir etse] kuvvet (T) uygulanmıştır.

Teğetsel kuvvet azaltıldığında, diyelim 772 olduğunda, deneysel olarak sürtünme kuvvetinin 772' ye gerilediği bulunur. Bu, sürtünme kuvvetinin ilk nitel kanununu ifade eder: "Teğetsel kuvvetlerin bileşkesinin, işbu özel duruma özgü bazı kuvvet parametresinden küçük olması durumunda, sürtünme kuvveti, uygulanan kuvvetlerin bileşkesine eşit ve karşıt olacak olup hiçbir teğetsel hareket vaki olmayacaktır". Bu kanuna istisna, sadece bir mikroskobik ölçüde görülür. Araştırmalar, önce bir \hat{i} teğetsel kuvvetin uygulanmasında, T nin yönünde ağırlığın çok küçük bir yer değiştirmesinin (örneğin 10^{-5} veya 10^{-4} cm mesafesinde), az çok ani olarak vaki olduğunu göstermiştir (Şek. 39). Bundan sonra hareket duruyor, malzemelerden birinin sürünme eğiliminde olmaması koşulu ile;



Şek. 39.- Gösterilen büyüklükte teğetsel yer değiştirmeyi hasil etmek için gerekli T/N oranının grafiği

Bu durumda ağırlık, yüzey üzerinde, sonradan kaybolacak kadar küçülen makul bir hızda (örneğin 10^{-6} cm/sn) sürtünme eğilimini gösterir. Bu gibi olgular karşısında T teğetsel kuvvetle F sürtünme kuvveti arasında çok hafif eşitsizliklerin bulunacağı anlaşılır.

Dikkat nazara alınacak ikinci durum, uygulanan T kuvvetinin kaymayı hasil etmeye yeterli olduğu durumdur; bunda, T uygulandığında, ağırlık hareket eder. Cismin T yönünde hareket ettiği deneysel olarak saptanmış olup buradan sürtünme kuvvetinin, T den küçük olsa da, hâlâ T ile aynı çizgide olduğu istidlal edilir. Bu, sürtünme kuvvetinin ikinci nitel özelliği olarak telakki edilebilir: "Teğetsel hareket vaki olduğunda sürtünme kuvveti daima, yüzeylerin nispî hızlarının yönüne karşıt yönde etki yapar".

Geri kalan sürtünme kanunları, sürtünme kuvvetinin büyüklüğüne aittir. Makroskobik ölçüde gözlenebilen başlıca değişkenlerin, yani uygulanan yük, temas bölgesinin boyutu ve kayma hızının fonksiyonu olarak sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü ifade etmek için üç nicel

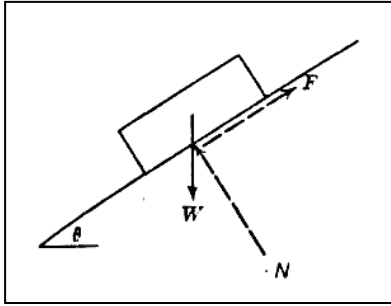
münasebet gereklidir. Bu üç nicel münasebet aşağıdadır : F sürtünme kuvveti, N dikey yüklerle orantılıdır:

$$F = \mu N$$

Bu münasebet bir μ sürtünme katsayısını tanımlama olanağını sağlıyor. Alternatif olarak bu kanunu bir sabit sükûnet açısı ile ifade etmek çoğu kez uygun olmaktadır; bu θ açısı, ya da sürtünme açısı

$$\text{tg } \theta = \mu$$

şeklinde tanımlanır. Bu, üzerine konmuş herhangi bir ağırlıkta bir cismin sabit kalacağı bir meyilli düzlemin açısı olup bu açı herhangi bir miktarda artırılacak olursa, cisim aşağıya kayacaktır (Şek. 40).



$$\begin{aligned} F &= W \sin \theta \\ N &= W \cos \theta \\ F/N &= \mu = \text{tg } \theta \end{aligned}$$

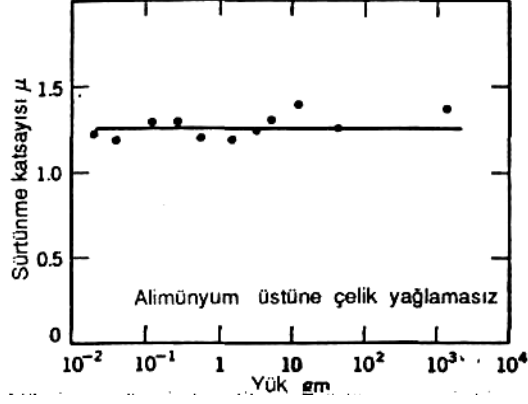
Şek. 40 .- Bircisinin bir meyilli düzlem üzerinde denge diyagramı. Aşağı kayma başlamak üzeredir.

İkinci münasebet : Sürtünme kuvveti A_a görünür temas alanından bağımsızdır. Böylece de iri ve küçük cisimler aynı sürtünme katsayısını haizdirler.

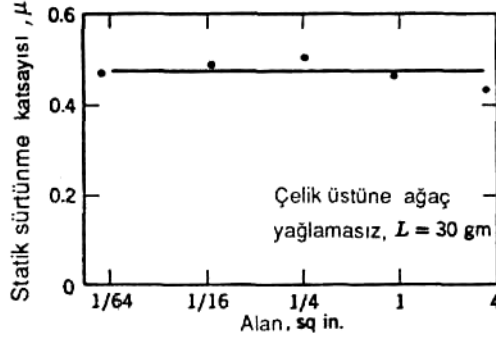
Üçüncü münasebet: Sürtünme kuvveti v kayma hızından bağımsızdır. Bu kanun, kaymayı başlatmak için gerekli kuvvetin, kaymayı herhangi bir hızda tutmak için gerekli olan kuvvetle aynı olacağını gerektirir.

Birlikte ele alındıklarında bu üç kanun, sürtünmenin genellikle mühendislerce içinde ele alındıkları nicel çerçeveyi sağlamaktadırlar. Bu itibarla bu kanunların pratikte ne denli uygunluk arz ettiklerini araştırmak önemli olmaktadır.

İlk iki nicel kanuna genellikle iyi uyulmaktadır, istisnalar çoğu durumda az bir orandadır.(Sek. 41 ve 42). ilkinde istisnalar çoğunlukla elmas tribi çok sert

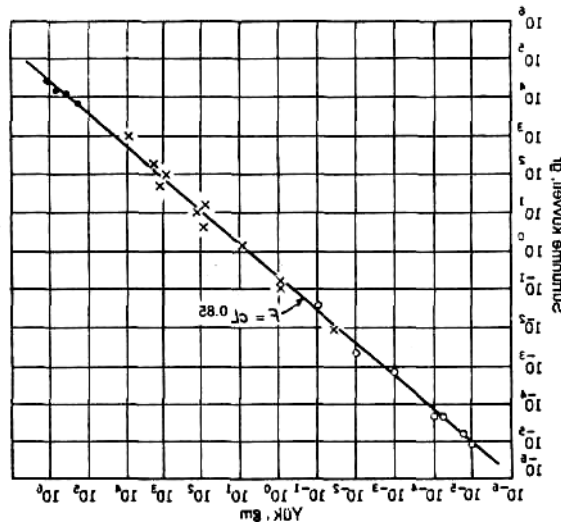


Şek. 41 .- Alüminyum üzerinde çelik için sürtünme, geniş bir yük aralığında yükten bağımsızdır.



Şek. 42 .- Tahtanın çelik üstünde sürtünmesi üzerinde temas alanı değişmelerinin etkisi. Önemli bir değişme görülmemiştir.

malzemelerle teflon gibi çok yumuşak malzemelerde vaki olur (Şek. 43). Birçok durumda malzemelere dair kayma terkipleri $F = c \cdot N^x$ şeklinde bir kanuna uyarlar; burada c. bir sabite ve x de, 2/3 ten 1' e kadar değişen bir kesirdir.



Şek. 43.- Teflonun sürtünmesi üzerinde yükün etkisine dair araştırmacılar tarafından derlenmiş veriler Bittabi, ilk kanuna uyulduğunda = 1 olur.

Sürtünme kuvvetinin yükle orantılı olmadığı bir başka durum da, bir yumuşak alt tabaka üzerine ince bir sert tabakalı yüzeyde vaki olur. Alçak yüklerde ince sert tabaka kırılmadan kalır

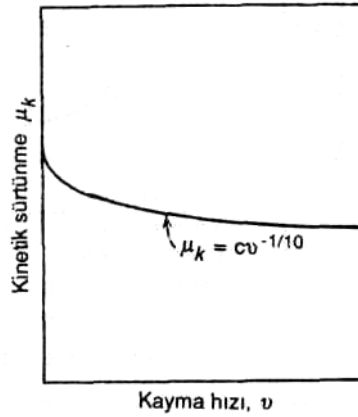
ve onun sürtünme nitelikleri egemen olur. Yüksek yüklerde yüzey tabakası arada kırılır ve alt tabakanın nitelikleri en önemli hale gelir.

Sürtünmenin görünür temas alanından bağımsız olduğunu ifade eden ikinci nicel kanundan sapmalara bazen çok düzgün ve çok temiz yüzeylerde rastlanır. Bu koşullarda yüzeyler arasında çok kuvveti karşılıklı etkiler yer alır şöyle ki sürtünme kuvveti yüklen müstakil ama doğruca görünür temas alanıyla orantılı olur (bu arada görünür temas alanı gerçek temas alanı olmuştur).

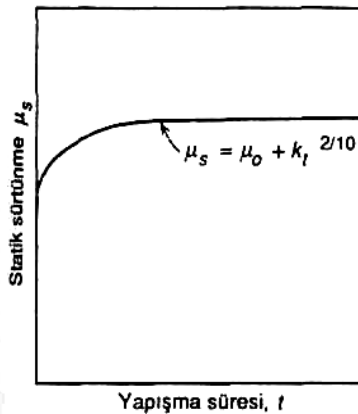
Bilinci ve ikinci nicel kanunlara iyi uyulduğu ve istisnainin nadir olduğu vurgulanacaktır. Buna karşılık, sürtünme kuvvetinin hızdan müstakil olduğunu ifade eden üçüncü kanunun durumu çok farklıdır.

Kaymayı başlatmak için gerekli sürtünme kuvvetinin, kaymayı devam ettirmek için gerekli olandan genellikle daha büyük olduğu iyice bilinir; bu keyfiyet iki sürtünme katsayısı, (sükûnette yüzeyler için) statik, (hareket halinde yüzeyler için) kinetik katsayı kavramına yol açmıştır. Bunlar mutata olarak sürtünme katsayıları cetvellerinde ayrı ayrı gösterilirler.

Bununla birlikte yeni çalışmalar bunun fazlaca bir basite indirgeme olduğunu, statik sürtünme katsayısının, temas süresinin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir; burada buruda kinetik sürtünme katsayısı, hızlar aralığı içinde hızın bir fonksiyonudur. Tipik statik sürtünme-süre ve kinetik sürtünme hız grafikleri şematik olarak Şek. 44 ve 45' de görülür.



Şek. 44.- Yapılma süresinin fonksiyonu olarak tipik statik katsayı grafiği



Şek:45 Kayma hızının fonksiyonu olarak tipik kinetik katsayı grafiği

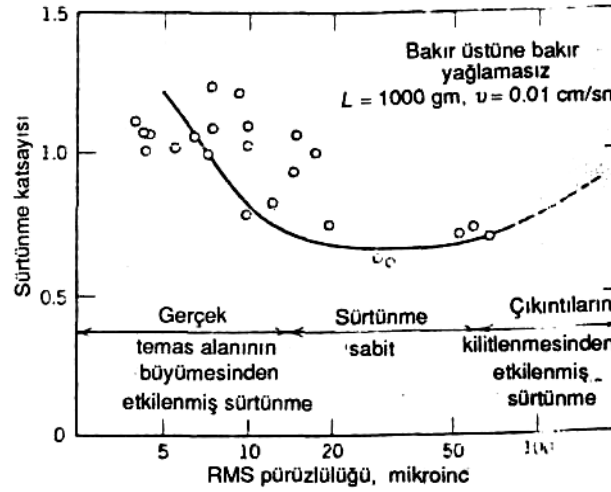
Statik sürtünme katsayısının en belirgin şekilde kısa statik temas sürelerinde değiştikleri kaydedilecektir; o ise ki daha uzun temas sürelerinde sürtünme katsayısı, yapışma süresinin bir logaritmik fonksiyonu olup statik temas süresinin her on kat artışında ancak yüzde birkaç miktarında artar.

Kinetik sürtünme katsayısı genellikle yavaş kayma hızlarında bir pozitif meyli ve yüksek kayma hızlarında da bir negatif meyli haizdir. Bu meyiller, sürtünme katsayısı hızın logaritması olarak noktalandığında geniş bir hızlar aralığında düz çizgiler olmaktadır.

Hız artınca sürtenine katsayısının azaldığı kayma sistemleri özellikle ilginçtir. Bu hız aralığı içinde, sürtünme titreşimleri meydana gelebilir ve böylece de yırtılmalar, yarılmalar işbu birçok kayma sistemlerinde hasıl olabilir. Bu konuya ilerde döneceğiz.

Buraya kadar ileri sürülen mütalâalarda yüzey pürüzlülüğünden hiç söz edilmedi. Belki de, yüzey pürüzlülüğü durumuna özgül olarak uygulanacak bir kanun ortaya koyabiliriz: "Sürtünme kuvveti, kayan yüzeylerin pürüzlülüğünden bağımsızdır."

Aslında bu kaide bir nevi fazla basitleştirme oluyor. Yüzey pürüzlülüğünün fonksiyonu olmak sürtünmenin tam bir grafiği, Şek. 46' da görülür.



Şek. 46.- Pürüzlülük karşılığında sürtünmenin grafiği, aşırı birleşme büyümesinden ileri gelen bir negatif eğim bölgesi ile çıkıntılarının birbirleriyle kilitletmelerinden ötürü bir pozitif bölge arz eder. Arada, sürtünme pürüzlülükten bağımsızdır.

Çok düzgün yüzeylerde sürtünme yüksek olma eğilimindedir şöyle ki gerçek temas yüzeyi aşırı ölçüde büyür, o ise ki çok pürüzlü yüzeylerde sürtünmenin fazlalığı, bir yüzeyi, öbürünün pürüzlerinin üstüne çıkarma gereğinden doğmaktadır. Genellikle mühendislik uygulamalarında kullanılan ara alanda sürtünme bir minimumda ve az çok pürüzlülükten bağımsızdır.

Pürüzlü bir yüzeyin düzgün yüzeydekine göre daha yüksek bir sürtünme gösteren bir istisnai durum, bir pürüzlü sert cismin çok daha yumuşak bir yüzey üzerinde kayması halidir. Burada pürüzlü yüzeyin çıkıntıları ona yumuşak malzemeyi kazıma olanağını veriyor ve böylece de A_r ile temsil edilen gerçek temas alanı büyümüş oluyor.

Şimdi bu gördüklerimizin ışığında konuyu toparlayalım ve başlıca kavram ve tanımlamalara

açıklık getirmeye çalışalım.

Katı cisimlerin dış sürtünmesi, gerçek temas alanlarında ve cisimlerin nispî tegetsel hareketi sırasında ince yüzey tabakalarında vaki olan çeşitli süreçlere tâbi çapraşık bir olgudur. Sürtünmenin dış kuvvetleri sabit olmayıp sürtünme kuvvetlerinin işi, katı cisimlerin yer değiştirme mesafesine bağlıdır. Sürtünme kuvvetinin büyüklüğü genellikle katıların bir tegetsel yönde yer değiştirmeleriyle saptanmış olur; işbu yer değiştirmeye bağlı olarak, dış statik sürtünme kuvveti, dış statik sürtünmenin kısmî kuvveti ve dış kinetik sürtünme kuvveti arasında tefrik yapılıdır.

Dış statik sürtünmenin kısmî kuvveti, küçük, kısmen tersine çevrilebilir ve başlangıç yer değiştirmeleri adı verilen tegetsel yer değiştirmeler durumunda harekete karşı direnç kuvvetidir. Bu kuvvet, temas eden cisimlere uygulanmış kuvvetlerin etkisi altında hiçbir sürekli kaymanın yer almadığı sürtünmeli birleşmelerde vaki olur. Dış statik sürtünmenin kuvveti, maksimum başlangıç yer değiştirmeye tekabül eden dış statik sürtünmenin kısmî kuvvetinin büyüklüğüdür.

Dış kayma sürtünmesi kuvveti, temas eden cisimlerin tegetsel yer değiştirmelerine direnç olup bu, yer değiştirmenin büyüklüğüne bağlı değildir.

Dış sürtünme, daha sert yüzey çıkıntılarının girmesiyle daha yumuşak cisimde dış tabakada vaki şiddetli şekil değiştirmeye (deformasyona) dairdir. Ancak, yüzey tabakasının her deformasyonuna dış sürtünme adının verilmeyeceği de kaydedilecektir; gerçekten dış sürtünme sadece malzemenin bütünlüğüne zarar vermeden temas halindeki cisimlerin nispî tegetsel yer değiştirmesi nedeniyle vaki olan deformasyonu kapsayıp ince dış tabakanın altındaki malzemeninki ihmal edilecek kadar azdır.

Nispî yer değiştirmenin kinetik karakterine gelince, kayma sürtünmesiyle yuvarlanma sürtünmesi arasında tefrik yapılıdır; bu her iki sürtünme türü çoğu kez birbirini takip eder.

Dış sürtünmenin, çok ince yüzey altı tabakalarında ve gerçek temas alanlarında katı cisimleri ayıran sınırdaki süreçlerin denetiminde olması itibariyle sürtünme kuvveti bu yüzey altı tabakaların fiziko-mekanik niteliklerine bağlıdır. Bu tabakaların nitelikleri, bunların altında bulunan tabakalarınkilerinden farklıdır. Bunun nedeni atomlar arası (moleküller arası, ionlar arası) kuvvetlerin yüzey altı tabakalarda simetrik olmayışları ve atomların (moleküllerin, tonların), malzeme kitlesi içinde enerji düzeyinin minimumuna tekabül eden pozisyonları alamamalarıdır. Yüzey altı tabakalarının dokusu keza yüzeyin işlenmesi ile çarpıtılması ve bu tabakaların deformasyonu ve sürtünme süreci içinde sıcaklık değişimleri ile bozulur. Bu nedenlerle yüzey altı tabakalarının iç enerjisi, metalin (malzemenin) kitlesi içindeki enerjiden yüksek olacaktır.

Çevre ortamının atomları (molekülleri) katı cismin yüzeyinde adsorbe olurlar ve katı cisimle kimyasal bileşim filmleri vücuda getirirler. En basit durumda bunlar oksit filmleridir. Böylece de yüzey altı tabakaları genellikle distorsiyona uğramış dokuya sahiptirler ve oksit filmleri ve bir, hiç değilse havanın çevresinde, adsorbe olmuş su veya gaz buharları tek tabakasını içerirler. Temas halinde katı cisimlerin karşılıklı etkilerini azaltmak amacıyla çok sık yağlamaya başvurulur. Bunun sonucunda dış sürtünme durumunda cisimlerin karşılıklı etkisi,

cisimlerin kendilerinin yerine cisimleri kaplayan filmler arasında vaki olur. Katıların yüzey koşuluna bağlı olarak, yağlamasız sürtünme, sınır sürtünmesi ve akışkan sürtünme masında ayırım yapılır.

Sınır sürtünmesi, aralarında, nitelikleri yağlayıcı kitleninkinden farklı olan bir akışkan tabakayı haiz iki katı cismin sürtünmesidir. Araştırmalar, 0,1 μm kalınlığında bir akışkan tabakanın niteliklerinin genellikle akışkan kitlesininkilerden farklı olduğunu ve dolayısıyla mutad hidrodinamik denklemlerin bu ince tabakalara uygulanamayacağını göstermiştir.

Kayma sürtünmesi katsayısı, kayma sürtünmesi kuvvetinin, sürtünen yüzeyler üzerine etki yapan dış kuvvetlerin dikey bileşkesine oranıdır (Şek. 41'e bkz).

A.II.1.2 Sürtünme kuvvetinin köken ve büyüklüğü - Katı cisimlerin karşılıklı etkileri

Sürtünmenin moleküler - mekanik (ya da yapışma - deformasyonlu) teorisi son yıllarda temas halindeki katıların karşılıklı etkilerinin izahında geniş ölçüde kullanılmıştır.

iki cisim arasında gerçek temas alanlarında birbirine dokunan yüzeylerden daha yumuşak olanına daha sert çıkıntılarının nüfuz etmesi, bunların farklı mekanik özellikleri, cisimlerin ayrı bölümlerinde bu özelliklerde değişimler ve temas alanlarının geometrik dış çizgilerindeki farklılıklar itibariyle hesaba katılır. Bu nedenle bir cismin bir diğerine göre kayması, daha yumuşak yüzey tabakasının daha sert çıkıntılar tarafından bozulmasına götürecektir. Kaymada yüzey tabakalarının deformasyona dirençleri, sürtünme kuvvetinin mekanik (ya da deformasyonlu) bileşeni (komponenti) adını alır.

Bu, katıların mekaniğinin ana prensipleri kullanılmak, yüzey tabakalarının mekanik özellikleri, çıkıntılarının geometrik biçimi ve temas eden alanın gerilme durumları esasına göre hesap edilebilir.

Dış sürtünmede yüzey tabakalarının deformasyonunun yanısıra, temas eden cisimlerin 10 cm kadar küçük mesafelerle ayrılmış bölümlerinde görülebilir moleküler etkileşimler fark edilmektedir.

Bu etkileşimlerin sonucu olan nispi kaymaya direnç, sürtünme kuvvetinin moleküler bileşeni (komponenti) adını alır. Bu bileşen çoğu kez yapışma komponenti olarak bilinir; mamafih terim tam doğru değildir şöyle ki yapışma, moleküler etkileşimi niteleyen çekme ve itme kuvvetlerinden farklı bir kavramdır.

Malzemenin, temas alanlarında atomlar arası (moleküller arası) itme kuvvetlerinin çekme kuvvetlerine eşit oluncaya kadar deformasyona uğrayacağı dikkate alınarak gerçek temas alanı, bu eşitliğin gerçekleştiği ilk alanların bir birliği olarak tanımlanabilir. Moleküler etkileşimin kendini ciddi gösterdiği alanın, 12. klas yüzey pürüzlülüğünün altında işlenmiş yüzeylerdeki gerçek temas alanına tekabül ettiği varsayılabilir.

Katı cisimlerin yüzeylerinde kalınlık ve dokusu çevrelere bağlı filmlerin varlığı nedeniyle, fiilî koşullar için sürtünmenin moleküler komponentini teorik olarak hesaplamak mümkün olamamıştır. Bu itibarla bu komponent, deneysel olarak bulunmuş (aşağıda kısaca bahsedilecek)

sürtünmenin dış katsayısının moleküler komponenti ve gerçek temas alanlarında etkin olan ortalama dikey gerilmeler vasıtasıyla hesap edilir. 13. ve daha yüksek yüzey pürüzlülükte işlenmiş yüzeylerde moleküler komponent, temassız etkileşim dikkate alınmak saptanacaktır. Dış sürtünmenin toplam kuvveti iki komponentin yani T_{ml} moleküler komponentle T_{mc} mekanik komponentin toplamına eşit olacaktır.

$$T = T_{ml} + T_{mc} \quad (1)$$

Bu arada, sürtünme kuvvetinin moleküler ve mekanik komponentlerinin birbirleriyle ilişki halinde oldukları ve aritmetik toplamın sadece tüm sürtünme kuvvetinin bir kaba tahmini için alınabileceği kaydedilecektir.

Sürtünme kuvvetinin bulmak için, temas alanlarında deformasyonun şeklinin ve çıkıntılarının geometrik biçimlerinin bilinmesi gerekir. Gerçek temas alanlarında deformasyonlar, birbirine sürtünen katıların mekanik nitelikleri, uygulanmış kuvvetin büyüklüğü ve yüzeylerin mikrotopografyasına bağlıdır.

Bir pürüzlü yüzeyin yarıküresel modeli, sürtünme halinde katıların etkileşimlerini hesap etmede en geniş uygulama alanını bulmuştur. Nüfuz edilen, dış sürtünme koşullarının etkin olduğu alanda, bir aynı çıkıntının yan küresel modeli, gerçek temas alanı.. saptamada, % 10' u; temas alanlarında ortalama dikey gerilmenin saptanmasında % 4' ü ve sürtünme katsayısının saptanmasında da % 7' yi geçmeyen bir hata verir.

Bu olgular, bizi aşağıdaki önemli sonuçlara götürür: Önce, çıkıntılarının doruklarının yükseklik olarak dağılımları ve bir pürüzlü yüzeyin yarıküresel modeli, bir ve aynı fonksiyon tarafından betimlenir' ki bu arada, temas alanı ve yarıküresel model için yaklaşımın gerçek cismin taşıma alanı eğrisi tarafından saptandığı ve temas alanının, model ve gerçek cisimde ortalama alanları aynı olan ayrı ayrı temas noktalarından teşekkül ettiği varsayılmıştır. İkinci olarak, gerçek alan ve bir pürüzlü yüzeyin çıkıntılarının yarıküresel modelinde eş yaklaşım büyüklükleri, eş temas alanlarına, eş yük ve kaymada eş sürtünme kuvvetlerine tekabül eder.

Katı cisimlerin temasında daha sert bölümlerin daha yumuşak olanlara nüfuz ettiği ve ilkinin deformasyonunun ihmal edilebilecek kadar az olduğu hesaba katılarak, cisimlerden birinin, cisimler arası etkileşim bahis konusu olduğunda, tamamen rijid olduğu kabul edilebilir. Pürüzlü yüzeyin bir düzlemlerle teması bireysel olacaktır. Temas etkileşimi hesap edildiğinde ayrı ayrı deformasyon bölgelerinin karşılıklı etkileri ihmal edilebilir şöyle ki, temas alanlarında elastik deformasyonlar sırasında bu etki küçük olup plastik deformasyonlar sırasında rol oynar.

Şekil değiştirmiş bir düzlem boyunca kayan bir yarıküre sorununun çözümü , bütünlüğün altüst olmasının nüfuz sırasında vaki olduğunu göstermiştir.

$$\frac{h}{r} \leq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \tau_n}{\sigma_r} \right) \quad (2)$$

h yaklaşım ile p_c çevre basıncı arasındaki

$$h = \frac{R_{max}}{b} \left(\frac{2 p_c}{HB} \right)^{1/v} \quad (3)$$

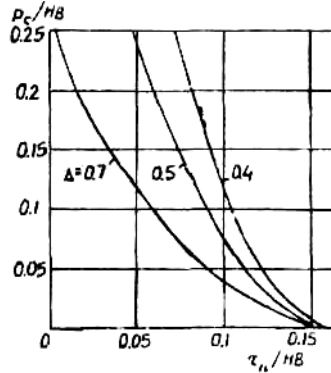
ilişki dolayısıyla, p_c nin maksimum değerleri için aşağıdaki ifade elde edilecektir ki bu, geçildiğinde, dış sürtünme koşullarında bir kopmaya götürecektir :

$$p_c = \frac{HB}{2^{v+1} \Delta^v} \left(1 - \frac{6 \tau_n}{HB} \right)^v$$

En yaygın yüzey bitirme klaslarında $b = 2$ ve $v = 2$ olup buradan

$$p_c = \frac{0.125 HB}{\Delta^2} \left(1 - \frac{6 \tau_n}{HB} \right)^2$$

bulunur. (4) formülüne göre, $rb^{1/v} / R_{max}$ 'in çeşitli değerleri için p_c/HB ve t_n/HB arasındaki ilişki, şek. 47' de gösterilmiştir.



Şek : 47 p_c / HB ile t_n / HB arasındaki ilişki

(4) formülü ile yapılmış olan hesaplara göre, gerçek temas alanlarında moleküler etkileşimlerden hasil olan teğetsel gerilmelerin dış sürtünmenin sınırını saptayan p_c nin düzeyini ciddi olarak etkiler, $\tau_n = 0.4 \sigma_T$ de, dış sürtünme, nispi olarak kaba bitirilmiş yüzey ve

önemli çevre basınçlarında $\left(\frac{p_c}{HB} > 0.04 \right)$ bile yer alır.

$$\tau_n = \sigma_T / 2$$

ye yakın geldikçe, dış sürtünmenin sınırı, basınçların aşağı değerleri bölgesine doğru değişir ve dış sürtünme sadece çok ince bitirilmiş - işlenmiş yüzeylerde (küçük yüklerde 9-10 yüzey pürüzlülüğü klası - GOST 2789).

Moleküler karşılıklı etkiden yüzey arasında ileri gelen t_n teğetsel gerilmeler, normal gerilmelerin bir fonksiyonudur.

$$T_n = T_o + \beta p_r$$

Aşağıda sürtünme parametreleri olarak adlandırılacak olan t_o ve β sabiteleri, bir sürtünmeli birleşmenin çalışma koşullarına bağlıdır. İki katı cismin yüzey arasında daima, yağlama filmleri, oksitler, adsorbe olmuş buharlar ve gazlan içeren bir nevi üçüncü cismin

varlığı farz edilerek ve yüzey tabakalarının kitlesel deformasyonu boyunca dış sürtünmenin üçüncü cisimde bir lüzuci (viskoz) akışı gerektirdiği dikkate alınarak T_o ve β sürtünme parametreleri için aşağıdaki ifadeler türetilebilir :

$$\tau_o = A (T) c_1 e^{\frac{\beta}{kT}}$$

$$\beta = \frac{A (T) c_1 e^{\frac{\beta}{kT}} \gamma}{kT}$$

Burada $A (T)$ = sıcaklığın bir fonksiyonu ; $c_1 = \mathbf{d}_v / \mathbf{d}_z$ - hız gradieni; β ve $\gamma =$ bir sabit sıcaklıkta sabiteler ve $k =$ Boltzman sabitesidir.

Kayan katıların temas etkileşimi, temas alanında deformasyon tipi ve temas yoğunluğunun büyüklüğü tarafından ciddi şekilde etkilenir. Elastik, elastik-plastik ve plastik deformasyonlar, gerçek temas alanlarında yer alabilirler. Elastik-plastik deformasyonlar en sık vaki olanlardır. Bununla birlikte bazı durumlarda sadece elastik deformasyonların (10 veya daha yüksek yüzey pürüzlülüğü klaslarında

$p_c < 100 \text{ kgf/cm}^2$ çevre basınçlarında) ya da sadece plastik deformasyonların (8. klas pürüzlülükte işlenmiş yüzeylerin $p_c > 100 \text{ kgf/cm}^2$ çevre basıncında) temas

alanlarında vaki olduğu varsayılarak hesaplar yürütülebilir. Elastik-plastik deformasyonlar durumunda katı cisimlerin etkileşimleri açık olarak anlaşılmamıştır. Bu nedenle sadece elastik ve plastik deformasyonlar için dış sürtünme katsayılarının hesabına dair formülleri vereceğiz.

Plastik temas, derine nüfuz etmiş çıkıntıda maksimum gerilmelerin birbiri üzerinde kayan çiftin en yumuşağının Brinell sertliğinden aşağı olması halinde yer alır

bu,

$$\frac{h}{r} = 2,4 (1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2$$

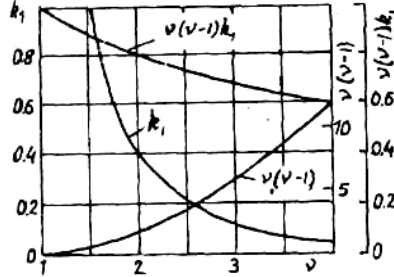
yaklaşımına tekabül eder;çevre basıncıda

$$p_c \leq \frac{2,4^{\frac{2\nu+1}{2}} \nu(\nu-1) k_1 HB^{2\nu+1} (1-\mu^2)^{2\nu}}{5 E^{2\nu} \Delta^\nu}$$

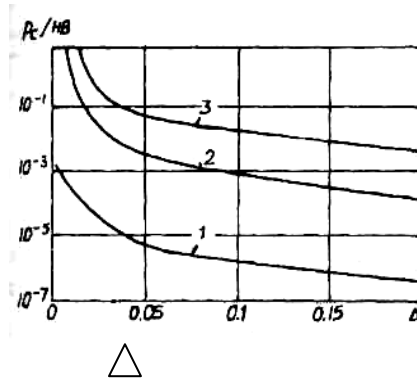
olup burada k_1 , ν ye bağlı entegrasyon sabitesidir.

ν nün fonksiyonu olarak k_1 ve ν ($\nu - 1$) k_1 i gösteren grafik şek. 48' de verilmiştir. Mühendislik komponentlerde en sık kullanılan yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ($\nu = 2$, $b = 2$)

$$p_c = \frac{1.4 HB^5 (1 - \mu^2)^4}{\Delta^2 E^4} \text{ olur.}$$



Şek 48 : k_1 ile $k_1 (v-1)$ in v ye bağımlılığı



- 0.01, $\mu=0.3$;
- 2- $HB/E=0.05$, $\mu=0.5$;
- 3- $HB/E=0.1$, $\mu=0.5$

Şek 49 : p_c ile HB/E arasındaki münasebet

Elastikten elastik-plastik deformasyonlara intikali sağlayan p_c çevre basınçlarında çeşitli HB/E oranlarında yüzey pürüzlülüğünün fonksiyonu olarak değişme, şek. 49' da gösterilmiştir. Böylece, yüksek elastikiyet modülüne sahip malzemelerde (örneğin metallerde) başlangıç yüklemesinde elastik temas sadece $< 0,005$ ile ince işlenmiş yüzeylerde, yani yüzey pürüzlülüğünün 10 ila 11. klaslarında (GOST 2789) mümkündür. Polymerlerde elastik temas p_c/HB nın büyük değerlerinde ve metallerinkilere göre daha aşağı pürüzlülük klaslarında mümkündür.

Temas alanlarında elastik deformasyonlarda, dış sürtünme kuvvetinin mekanik bileşeni, katıların tam olmayan elastikliğinden meydana gelir. Bu nedenle, nüfuz eden çıkıntılar tarafından yüzey tabakasına şekil değiştirilmiş olması, histeresis kayıplarından ileri gelen nispi kaymaya direnci teşvik eder. Aşağıda, temas alanında elastik deformasyon için dış sürtünme katsayısını hesap etmek için formüller verilmiştir.

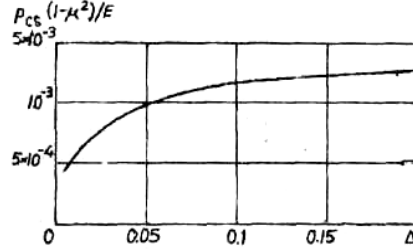
Seyrek temas, n_r temas eden çıkıntı sayısının çevre basınçlarına tekabil eden ne çevre temas alanındaki çıkıntı sayısından az olduğunda yer alır:

$$p_c < p_{cs} = \frac{8 \times 10^{-2} \Delta^{1/2} E}{(b^{1/\nu} \nu)^{2\nu+1} (1-\mu^2)} \quad (1)$$

veya, normal olarak kullanılan mühendislik yüzey pürüzlülük klaslarında ($\nu = 2$, $b = 2$)

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

Bu sonucu formüllerden hesap edilmiş, $p_{cs} (1 - \mu^2)/E$ ile $\Delta = R_{\max}/rb^{1/4}$ oranı arasındaki münasebet, şek. 50' de gösterilmiştir.



Şek. 50.- $p_{cs} (1 - \mu^2)/E$ ile Δ arasındaki münasebet

Görünürde, temas alanlarındaki elastik deformasyonlar sadece, kayan çiftin daha yumuşak malzemesinin alçak elastikiyet modülüne sahip olması halinde yoğun temas olarak sonuçlanabilir. Yüksek elastikiyet malzemelerde, yoğun temas hasil eden deformasyonlara geçişe tekabül eden çevre basınçlarından daha yüksek olmaya dönüşür.

Sürtünme kuvvetinin dikey yüke oranına eşit olan dış sürtünme katsayısı, moleküler ve mekanik komponentlerin toplamı olacaktır:

$$f = \frac{2.4 \tau_o (1 - \mu^2) r^{1/2}}{v(v-1) k_1 E h^{1/2}} + \beta + \frac{0.4 \alpha_f h^{1/2}}{k_1 v (v^2 - 1) r^{1/2}}$$

Burada α_f = çapraşık gerilme koşullarında histeresis kayıpları katsayısıdır. Kayan bir küresel sürtücü (iğne) için $\alpha_f = 2.5$ a α_h olup α_h = basit çekme – basmada-histeresis kayıpları katsayısıdır:Çeşitli malzemeler için α_h in değerleri Tablo 29'da verilmiştir.

Tablo 29-a α_h histeresis kayıpları katsayısı değerleri

Malzeme	α_h	Malzeme	α_h
Sert bakır	0.04	Kauçuk	0.09-0.13
Fosfor bronz	0.04	Tahta	0.2
Duralumin	0.03	Deri	
Sertleştirilmiş çelik	0.02	ham	0.06
Plastikler	0.08-0.12	sepilennmiş	0.1

En mutat yüzey işlenmelerinde ($v=2$, $b=2$)

$$f = \frac{3 \tau_o (1 - \mu^2) r^{1/2}}{E h^{1/2}} + \beta + 0.17 \alpha_f \left(\frac{h}{r}\right)^{1/2}$$

Son iki formülden, komponentlerden birinin toplam sürtünme katsayısında başat durumda olması, belli bir kayan çiftin çalışma koşullarına (τ_o ve B ve h yaklaşımın değerleri), r ile v yüzey pürüzlülük karakteristiklerine ve kayan çiftten yumuşak ohmının mekanik özelliklerine (E ve u) bağlı olduğu sonucu çıkar.

Temas alanında etkin elastik deformasyonlarda, dış sürtünme katsayısının mekanik

komponenti, yüksek elastikiyet modüllü ve alçak histeresis kaybı katsayılı malzemelerle alçak elastikiyet modüllü (kauçuk, plastikler) malzemelerde, moleküler komponentin büyük olduğu ($f_m / > 0,3$) hallerde, moleküler komponentin yanında ihmal edilebilir. Alçak elastikiyet modüllü kayan malzemelerin etkin olmak yağlanmış olmaları durumunda mekanik komponent ihmal edilemez; bu koşul, örneğin kauçuğun suyla sınır yağlaması ile kaydığı veya yan mamul deri eşyaların işlenmesinde meydana gelir.

Bu nedenle, istikrarlı bir sürtünme katsayısını gerektiren kayan çiftlerde, mekanik komponentin başat olduğu koşullar tertiplenecektir şöyle ki elkin sınır yağlaması sağlanacaktır. Bu gereksinme, özellikle, yol inşasında yerine getirilmektedir; burada dik yokuş ve keskin kavislerde kaba bir pürüzlülük verilir ve böylece yağmurlu havalarda tekerlerin yolun yüzeyine yeterli yapışması sağlanır.

Konuyu yine başlardan ve basitleştirerek ele almakta fayda var.

İki malzeme birbirine bastırıldığında mevcut olan gerçek temas alanı için $A_r = N/p$ denklemini ele almıştık. Bu hesap şimdi yüzeylerin birbirlerine bir N yükü ile bastırıldığı ve kaymanın bir T sürtünme kuvvetiyle hasil edildiği hali dikkate alınmak genişletilecektir. Kayma vaki olduğunda gerçek temas alanında ortalama makaslama gerilmesinin t_{Av} değerini haiz olduğu varsayıldığında, F toplam

kuvveti için

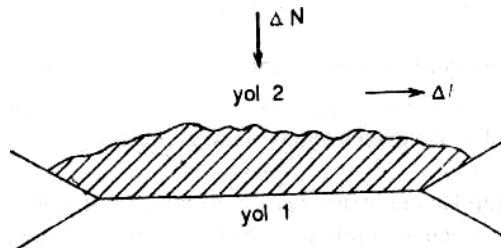
$$F = \tau_{Av} \cdot A_r$$

şeklinde bir denklem yazabiliriz. Buradan da sürtünme katsayısı

$$\mu \text{ veya } f = F/N = \tau_{Av} \cdot A_r/p \cdot A_r = \tau_{Av}/p$$

istidlal edilir.

Geriye, gerçek temas alanını teşkil eden birleşmelerin makaslama ortalama direncini değerlendirme işi kalır. Bir sınır analizi kullanılarak bu makaslama kuvvetinin r_y kitle makaslama mukavemetini (bundan böyle temas eden malzemelerin daha yumuşağının s olarak anılacaktır) fazlaca aşamayacağını göstermek kolay olur. Aşabilseydi, her birleşme bu büyüklükte makaslama gerilmesi meydana getirmeye yeterli bir makaslama kuvvetinin uygulanmasıyla birlikte daha yumuşak malzeme içinde yırtılırdı. Bu, daha sert malzemenin yüzeyine yapışan daha yumuşak malzemenin bir tanecik hasil ederdi (Şek. 51). Gerçekte bu tür taneciklerin oluşma oranı, bir hava çevresi içinde bulaşmamış metaller birlikte kaydıklarında hasil olan birleşme oluşma ve kapması oranının %1 ilâ 10' u kadar olup bundan birleşmelerinin çoğunluğunun az çok temas eden malzemelerin en zayıfı kadar kuvvetli olacağı istidlal edilir.



Şek. 51.- Yırtılmış (makaslanmış) bir birleşme. Birleşmenin makaslama mukavemetinin üstteki malzemenin kitle mukavemetinden çok büyük olması halinde makaslanma taranmış parçacığı hasil eden 2. yol boyunca yer alacaktır.

Burudan da

$$F = s \cdot A_r$$
$$\mu = s/p \quad \text{ve yine yazabiliriz.}$$

Bu sonucu denklemden μ sürtünme katsayısı iki s ve p miktarının oranı olarak yazılmış olup bu sonuçlar sırasıyla makaslama ve basmada, temas eden malzemelerin en zayıfının plastik akışa direncini temsil ederler. Bunlar az çok aynı yolla malzemelerin bağlantı mukavemeti, dislokasyonların tabiatı vb. niteliklerine bağlı çok yığın miktarlar olduklarından bu oranın hayli geniş malzeme alanında tamamen aynı olması bizi şaşırtmaz.

Böylece kurşun ve alçak karbonlu çelik makaslama mukavemeti ve nüfuziyet sertliği bakımından bire yüz fark ederken bu iki miktarın oranını temsil eden μ , çelik (1,0) ve kurşun (1,2) için az çok aynıdır.

Yukarıdaki ifadeler gözlenen sürtünme kanunlarını açıkça izafi ederler.

1.)Yüzey arası statik sürtünme mukavemetinin varlığı, yani hareketi sağlamak için belli bir minimum teğetsel kuvvetin gerekli olması, genel olarak plastik şekil değiştirmelerde tipiktir. Uygulanan makaslama kuvvetinin daha aşağı değerlerinde gözlenen hafif hareket, bireysel temas bölgelerinin elastik ve sürtünme deformasyonları olarak kolayca izah edilir.

2.)Harekete mukavemet gösteren kuvvetin, yer değiştirmenin aksi yönünde olması, plastik olarak şekil değiştirmiş izolotropik malzemelerin başka bir karakteristik davranışındır. Sadece temasların anizotropik olduğu özel durumlarda bu genel kaideden sapma önemli olur.

3.)Sürtünme kuvveti ile uygulanan yükün orantılılığı, her birinin temas halindeki yüzeylerde karakteristik bir malzeme sabitesinin aynı A_r gerçek temas alanı ile çarpımına eşit olmasının bir doğrudur sonucudur.

4.)Sürtünme kuvvetinin görünür temas alanı A_a dan bağımsız olması, iki malzeme arasındaki etkileşime görünen değil, gerçek temas alanının egemen olduğu kavramıyla kolayca izah edilir. Bu gerçek temas alanı, görünen alana bağlı değildir.

5.)Sürtünme kuvvetinin kayma hızına zayıf bağlantılı oluşu, daha genel bir olgunun, başlıca katıların çoğunun mukavemetlerinin gerilmenin uygulanma derecesine az bağımlılığının bir bölümü olarak izah edilebilir. Mukavemetinin önemli ölçüde şekil bozulma derecesine bağımlı olduğu katılar, sürtünme kuvvetinin kayma hızına büyük bağımlılığını arz ederler.

6.)Sürtünmenin yüzey pürüzlülüğüne zayıf bağımlılığı beklenir şöyle ki yüzey pürüzlülüğünün üstesinden gelmek için az sürtünme işi görülür, yapılan işin çoğu birleşme yüzey arasında makaslama yer değiştirmesi hasil ederek yapılır.

Birçok başka sürtünme olgusu yukarıda ileri sürülmüş sürtünme mekanizmasıyla izah edilir. Önce, temas halindeki malzemeler arasında alçak makaslama mukavemetli ince tabakalar oluşturan yağlayıcıların rolü vardır ki bu, s alçak makaslama mukavemetli ama p yüksek akış basınçlı ve dolayısıyla alçak sürtünmeli bir sistem teşkil eder. Aynı çizgi boyunca, kayma hızları çok yüksek değerlere çıkarıldığında her zaman gözlenen sürtünme azalması, yüzey arasının ısı

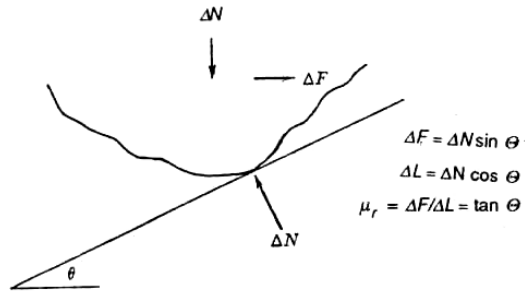
yumuşamasından ileri gelir şöyle ki. v alçalır, bu arada alt tabaka daha soğuktur ve dolayısıyla daha az yumuşamıştır (p yüksek).

Her ne kadar bu yapışma teorisi birçok eleştiriye hedef olmuşsa da teori, sürtünme alanında çalışanların çoğunluğunca desteklenmektedir.

A.II.1.3 Sürtünme kuvvetine iştirak eden başka etkenler

Yukarda kaymaya başlıca direncin temas halindeki malzemelerin kuvvetlice yapışmış yüzey atomlarını makaslamak gereğinden doğmakta olduğunu görmüştük. Her ne kadar bu, az çok her zaman toplam sürtünme kuvvetinin % 90 veya daha çoğunu ifade ediyorsa da, hesaba katılacak daha başka etkenler de vardır.

1.Pürüzlülük komponenti. Bu, pürüzlü yüzeylerin kayması sırasında bir yüzeyi öbürünün pürüzlülüğünün üzerine kaldırmak gereğinden doğuyor. Çıkıntının bir θ eğimini haiz olması halinde, $\tan \theta$ sürtünme katsayısına bir dahil olma vaki olacaktır (Şek. 52). Bununla birlikte biraz sonra sürtünmenin bir negatif bileşeni



Şek.52.- Bir çıkıntının bir meyilli sürtünmesiz düzlem üzerinde kaymasının diyagramı. Sürtünmenin μ_r bileşeni $\tan \theta$ a eşittir.

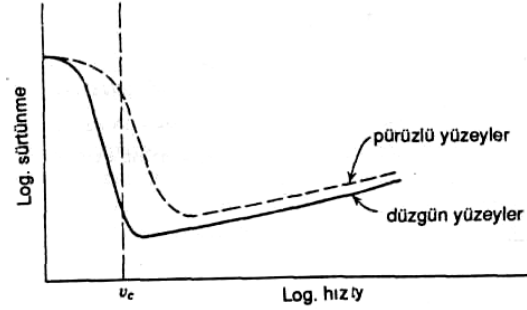
(komponenti) olabilecektir şöyle ki θ pozitif değerler gibi negatif değerler almaya meyiledecektir .Şek. 53).



Şek. 53 - İki pürüzlü yüzeyin şematik görünüşü. Birleşmenin birçoğu "bayır aşağı kaymaktadır".

Bütün temasları toplayarak pozitif θ ile negatif θ bölgelerinin aynı zamanda mevcut olduklarını kaydediyoruz şöyle ki bir ölçüde pürüzlülük sürtünme terimi sıfıra şaklaşma eğiliminde olur. Geri kalan ise topluca sürtünme katsayısına yaklaşık 0,05 lik bir iştirakte bulunur ki bu, sürtünme kuvvetinin başlıca yapışma komponenti üzerine binen bir kararsız kuvveti temsil eder.

Pürüzlülüğün sürtünme üzerinde etkisinin az olduğu kaidesine bir belirgin istisna bazen sıvılarla yağlanmış yüzeyler için geçerli olmaktadır. Bazı hızlarda düzgün yüzeyler bir hidrodinamik yağlama (u çok alçak) halinde çalışılabilir, bu arada pürüzlü yüzeyler sınır yağlamasında olurlar (u çok daha yüksek şek 54)Bu etken örneğin tabanlı otomobil lastiklerinin ıslak yolda kabak lastiğe üstünlüğünü sağlar. Ancak bunun kuru kayma sorunuyla hiç ilişkisi yoktur.



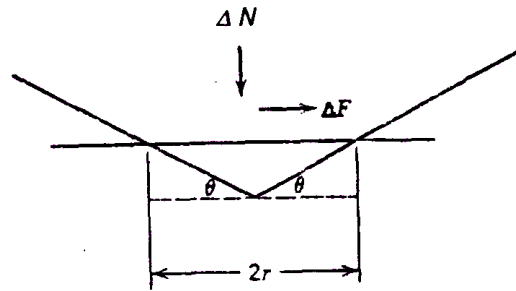
Şek. 54.- Kayan yüzeyler için hızın fonksiyonu olarak sürtünme. v_c ye yakın hızlarda düzgün yüzeyler dolu sıvı yağlamasıyla durlar, oysa ki pürüzlü yüzeyler, geniş ölçüde, sınır yağlamasındadırlar.

Devam etmeden önce bir hususu vurgulayalım : Sürtünmenin pürüzlülükten bağımsız olduğu bir olgu olup gerçekten neme kadar kabaca pürüzlü yüzeyler yüksek sürtünme arz ediyorsa da (kayma sırasında bir yüzeyi öbürünün kamburlarının üzerine çıkarma zorunlusundan) çok düzgün yüzeyler, gerçek temas alanının artması nedeniyle hatta daha yüksek sürtünme gösterirler.

2. "**Çift, sürme**" *komponenti*. Keskin uçlu bir sert yüzey bir yumuşak yüzey üzerinde kaydırıldığında, yumuşak yüzeyi kayma sırasında kazımaya ve bir oluk açmaya meyledecektir. Oluğun temsil ettiği deformasyon enerjisi sürtünme kuvveti tarafından sağlanacak olup bu kuvvet, dolayısıyla, hiç oluk açılmamış duruma göre daha büyük olacaktır.

Aynı şekilde bir sert yüzey üzerinde keskin çıkıntılar, bu yüzey daha yumuşak bir diğerinin üzerinde kaydırıldığında çizikler meydana getirebilir ve yine sürtünme kuvvetine bir ilâve bahis konusu olur.

Bir daha yumuşak yüzey üzerine bastırılmış θ açılı bir dairesel koni için (Şek. 55) bir basit hesap yapacağız. Kayma sırasında süpürülen A_p nüfuz edilmiş alan



Şek. 55.- Bir düz yüzeye bastırılmış bir koninin şematik görünüşü. Kayma sırasında, izdüşüm alanı $r^2 \text{tg } \theta$ olan bir oluk açılmıştır.

$$A_p = 1/2 \cdot 2r \cdot r \text{tg } \theta = r^2 \text{tg } \theta$$

olur.

Bu alana kayma sırasında yer değiştirme ihtiyacından ibaret olan ilâve kaymaya mukavemetin $A_{p,p}$ ye eşit olduğu kabul edildiğinde

$$F = \pi r^2 s + r^2 \text{tg } \theta \cdot p$$

$$N = \pi r^2 p$$

$$\mu = F/N = s/p + \text{tg } \theta / \pi$$

olur.

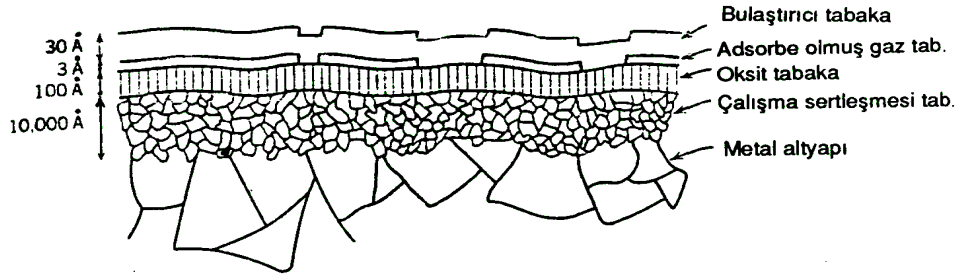
Gerçek pürüzlü yüzeylerde (örneğin zımpara kağıdı) 10^0 ,2 veya daha büyük ve [kazıma terimi de daha büyük olur. Genellikle 10^0 yaklaşık 0,05 veya daha az, kazıma terimi de kabili ihmal olur.

3. Elektriksel komponentler: Değişik malzemeler temas haline getirildiklerinde, birleşmelerde bir elektriksel çift tabakanın var olabileceği bilinir.

Bu birleşmelerin koparılmalarını birbirinden farklı elektriksel şarjların ayrılması takip edecek olup ve dolayısıyla sürtünme kuvvetinde bir artış olacaktır. Bu etki, erine göre, son derece küçük görünmektedir.

A.II.1.4 Metallerin sürtünmesi

İlik uygulamada metaller genellikle bir yağlayıcı madde aracılığı ile birbirleri üzerinde çalışırlar. Biz bu çalışmamızda yağlama teorisi üzerinde durmayıp doğruca, herhangi bir nedenle yağlama işlevinin yerine getirilememiş olması ya da bunun esasen olanaksız olduğu hallerdeki metalin metal veya metal olmayan malzemeye sürtünmesi sonucu hasil olan durumla ilgileneceğiz. Yağlanmamış metallerin sürtünme özelliklerini irdelemeye girişmeden önce bu özelliklerin, metaller üzerindeki yüzey filmlerinin varlığından büyük ölçüde etkileneceklerini vurgulamak gerekir. Genellikle, yağlanmamış metal bir endüstriyel çevrede birçok bu tür filmle kaplanacaktır (Şek. 56).



Şek. 56.- Bir metal yüzey üzerinde filmlerin görünüşü (ölçekte değil).

Metalin iç bünyesinin dışında çalışarak, metalle havanın oksijeninin reaksiyonunun hasil ettiği bir oksit tabakasına rastlarız. Bundan sonra atmosferden kaynaklanan bir adsorbe olmuş, başlıca bileşenleri genellikle su buharı ve oksijen molekülleri olan tabaka gelir. Dıştan da bunlar mutad olarak yağlanmış olurlar. Bu tipten metal yüzeylerin başlangıç sürtünme katsayıları, birlikte kaydıklarında genellikle 0,1 ilâ 0,3 aralığında olur. Mamafih yüzeyler birbirleri üzerinde kaydırılmaya devam ederse, bu koşullar altında sürtünme üzerinde en kesin etkisi bulunan yağ filmi yırtılacağından daha yüksek değerlere de varılır.