

### A.III.5 AŞINMA DERECESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Yukarıdaki (13),(14) ve (16) münasebetleri, çeşitli faktörlerin aşınma üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına olanak sağlarlar. Çeşitli talaş kaldırma yöntemleriyle elde edilmiş birçok yüzeyde, alıştırılmış yüzeylerde olduğu gibi,  $v = 2'$  dir. Malzemelerin çoğunda sürtünme yorulması parametreleri,  $t_f, 2 < t_f < 10$  dir.

$v$  ile  $t_f$  nin yukarıdaki değerlerine dayanarak Tablo 33, aşınma derecesini etkileyen çeşitli faktörleri hesaba katan parametrelerde,  $v$  ile  $t_f$  ye tâbi olarak üslerin değişmesini gösterir.

**Tablo 33.- Çeşitli faktörlerin aşınma üzerinde etkisi**

Sürtüşen yüzey	Aşağıdaki niceliğin üssü						
	$p_a$	$E$	$\Delta$	$H_b/R_b$	$f_{ml}$	$\tau_o$	$\alpha_h$
Pürüzlü, dalgasız ve alıştırılmamış	1,4 - 3	0,6 - 7	0,8 - 4	-	2 - 10	-	-
Pürüzlü, dalgalı ve alıştırılmamış	1,08 - 1,4	1,9 - 9,6	0,8 - 4	0,16 - 0,8	2 - 10	-	-
Alıştırılmış	1	0 - 4	-	-	2 - 10	0,5	1-5

Şimdi bu faktörlerin her birini ele alalım.

**Özgül yük (nominal basınç).** Alıştırılmamış yüzeylerde aşınma, özgül yükün lineer olmayan bir fonksiyonu olup yükün etkisi, küçük temas alanlı, yani dalgalı olmayan yüzeylerde çok daha gelişkindir ( $I = p_a^{(1,4 \text{ ila } 3)}$ ) Dalgalılık, bu münasebetin lineer olmayışını iyice azaltır. Alıştırılmış yüzeylerde aşınma derecesi doğruca özgül yükü değiştirir. Böylece genellikle  $I = p_a^{(1 \text{ ila } 3)}$  olur ki bu, makine parçalarının çalışma üzeri ve laboratuvar deneylerine uygun düşmektedir

**Malzemenin elastik özellikleri** (elastikiyet modülü). Elastikiyet modülünün, malzemenin aşınma derecesi üzerinde belirgin bir etkisi vardır şöyle ki bunun artışı, eş kopma mukavemetli malzemelerde  $f$  nin artışına götürür. Elastikiyet modülünün üssü çok geniş şekilde değişir ve en büyük salt değeri haizdir. Değişmenin işbu geniş aralığı, dalgalı olmayan pürüzlü yüzeyin temasına tekabül eder, oysa ki üssün en büyük salt değeri pürüzlü ve dalgalı yüzey içindir. Elastikiyet modülü ile aşınma derecesi arasında kesin ilişkinin deneysel olarak saptanması güçtür zira elastikiyet modülü aynı zamanda malzemelerin sürtünme özelliklerine, bilhassa sürtünme katsayısına, ve de mukavemet niteliklerine ( $O_o, t_f$ ) bağlıdır.

Mükemmel olmayan elastikiyet  $a_h$  histeresis kayıp faktörüyle hesaba alınır; bu sonucunun bilinmesi, alıştırılmış yüzeylerin aşınmasını peşinen tahmin etmek için esastır.

**Malzemenin mukavemet nitelikleri** ( $O_o, t_f$ ). Bu niteliklerin salt değerlerinden artışın aşınma ömrü üzerinde daima faydalı etkisi vardır.  $o_o$  ne kadar yüksek olursa, tek bir kırılmaya karşı malzeme o kadar kuvvetli olur;  $L$ - büyüdükçe bir

aşınma parçacığını koparmak için gerekli sayıkl sayısı o denli büyük olur. *Birleşmenin sürtünme özellikleri* ( $f$ 'sürtünme katsayısı). Aşınma derecesi, mukavemet özelliklerine ( $crj$  olduğu kadar kuvvetlice sürtünme katsayısına ( $I \sim f^t$ )bağlıdır. Münasebet basit değildir şöyle ki  $f(u)$  sürtünme katsayısı da malzemenin elastik özelliklerine, yüzey pürüzlülüğü, özgül yük ve temasta moleküler etkileşimleri niteleyen parametrelere bağlıdır.

***Yüzeylerin pürüzlülük ve dalgalılığı.*** Yüzey geometrisinin aşınma derecesi üze-; rinde belirgin bir etkisi vardır. Çapraşık  $\Delta$ pürüzlülük parametresinin  $10^{-3} < \Delta < 1$  arasında (yani dört büyüklük derecesi içinde) oynaması ve  $\Delta$  nın üssünün 0.8 ilâ 4 arasında bulunması itibariyle aşınma derecesinin hesabında pürüzlülüğün ihmali, birkaç büyüklük derecesinde hataya götürebilir.

Dalgalılık aşınma derecesini daha az ölçüde değiştirebilir şöyle ki  $10^{-3} > H_b/R_b > 10^{-6}$  olup üssün değeri birden azdır ve sadece dört kat artabilir ki en uç durumlarda bu, / nin iki büyüklük mertebesinde bir değişme verir. Bu itibarla, neme kadar dalgalılık parametresinin salt değerinin değerlendirilme hassasiyeti göreceli olarak alçak ise de, dalgalılık hesaba katılacaktır. Alıştırılmış sürtüşen yüzeylerin geometrisinin aşınma derecesi üzerinde etkisi yoktur.

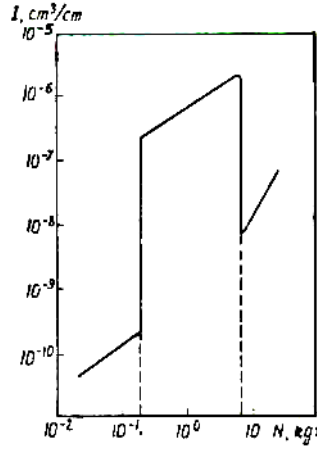
***Moleküler temas etkileşimi,*** çeşitli sürtüşme koşuluna, yani yağlayıcının türü, yüzeylerin temizlik derecesi, gaz çevresinin parametreleri ve temizlilik derecesine bağlı olup sürtünme katsayısı, özellikle  $t_o$  ve 3 parametreleri itibariyle hesaba alınır. Sürtünme yüzeylerinin aşınma derecesi, bunların makaslamaya mukavemetleriyle değişir. Böylece de yağlamanın, sürtüşen komponentlerin aşınma ömrünü uzatmaktaki rolü aşikâr olur.

***Hız ve sıcaklık faktörü.*** Aşınma derecesi üzerinde kayma hızının etkisi, daha önce de söylendiği gibi, yeterince anlaşılmış değildir. Kayma hızı, tek bir sürtünme bağlantısının varlığını ve dolayısıyla, malzemenin deformasyon derecesini saptar. Sürtünme bağlantısının tokluğu, bu nedenle, sürtünmeyi ve malzemelerin aşınmasını etkiler. Isı meydana getirilme şiddeti ve temas sıcaklığı, kayma hızına bağlıdır. Kolaylıkla anlaşılacağı gibi sürtüşen cisimlerde yüzey tabakalarının ısınması bunların mekanik ve sürtünme özelliklerinde ve de mekanik ve kimyasal yapılarında (dokularında) değişmelere yol açacaktır. Bu nedenle de aşınma-sıcaklık ilişkisi, malzemelerin nitelikleriyle sıcaklık arasındaki ilişki çerçevesi içinde irdelenecektir, yani aşınma derecesi denklemlerinde dahil bulunan  $t_f$ ,  $t_o$ ,  $f$  ve  $E$  ele alınacaktır

$E$  elastikiyet modülü, artan sıcaklıkla az değişir (azalır). Sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısı azalabilir, artabilir ya da değişmez kalabilir. Bu sürtünme katsayısının moleküler ve mekanik bileşenleri arasındaki oranın çeşitli değişmeleriyle izah edilir.  $t_f$  nin sıcaklıkla değişmesi hâlâ açık değildir. Bu nedenle  $t_f$  fiili sürtünme birleşmesinde etkin olan sıcaklık koşullarıyla aynı koşullar altında saptanacaktır

Özellikle zikredilmesi önemli olan, aşınma derecesiyle temasta ısı yaratılmasını niteleyen parametreler, ezcümle sıcaklık, hız ve yük arasındaki münasebeti temsil eden eğrilerdeki kritik

noktalardır. Mekanik ve kimyasal faktörlerin aynı andaki etkileri sırasında sıcaklık belli bir düzeye vardığında, malzemede esaslı değişmeler vaki olur, bunun yüzey tabakaları yeni mekanik özellikler edinir; bu sonuncuları, aşınma derecesinde birkaç büyüklük mertebesinde kademeli değişme takip eder (şek. 97). Bu tür kritik noktaları teşhis etmek için sürtünme ısı mukavemeti üzerinde deneyler yürütülecek olup bunlardan sürtünme katsayısı ve aşınma derecesinin sürtüşen yüzeye yakın yerde etkin sıcaklıkla ampirik münasebeti elde edilecektir.



Şek. 97.- % 0,52 C lu çeliğin  $v = 2,6$  m/sn hızda, yükü aşınmasının değişmesi

Çeşitli kayan çiftlerde aşınma derecesinin bu yöntemle hesap sonuçları, deneysel verilere memnuniyet verici bir uygunluk arz etmektedir. Denklemlere giren parametrelerde gelişigüzel değişmeler, sapmaların nedenlerinden biri olarak kabul edilebilir. Muhtemel farkın azalması yaklaşık bir pürüzlülük mertebesinde dir.

Teklif edilen bu yöntem, tasarımcıya aşağıdaki yararları sağlamaktadır: - hareketli bir birlemenin ömür beklentisi hesap edilebilir; - çeşitli süreç değişkenleri ve malzemelerin ve yağlayıcıların fiziko - mekanik özellikleri açığa çıkarılabilir; - bazı koşullarda elde edilmiş deneysel sonuçlar, başka koşullar için düzeltiler.

**Hesap örneği.** %0,45 lu çelitken bir flanş ve polikarbonattan bir sızdırmazlık halkasından oluşan bir aksel contanın aşınma derecesini hesap edelim. Flanşın sürtünme yüzeyi silindirik taşlama ile işlenmiş olup pürüzlülük parametresi  $R_a = 0$  dır.

Nominal basınç  $5 \text{ kgf/cm}^2$  dir. Sürtünme katsayısı 0,2 dir. Contanın 100 km kayma mesafesinde aşınmasını saptayalım.

Verilen çalışma koşulları altında polikarbonatın fiziko-mekanik özellikleri şöyledir.

$$: E = 12.000 \text{ kgf/cm}^2; \sigma_a = 8.400 \text{ kgf/cm}^2 \text{ ve } t_f = 2.9$$

Flanşın yüzey pürüzlülüğü, çapraşık  $A = 0,01$  pürüzlülük parametresi ve  $v = 2$  ile nitelenir.  $I$ , (13) formülü ile hesap edilecek; burada  $a = 1$ ,  $k_{fv} = 2,4$ :

$$I = 0,2 \times 0,5^{1.65} \times 2^{0.25} \times 2.4 \times 12.000^{1.32} \times 0,01^{1.16} \left( \frac{3 \times 0,2}{8.400} \right)^{2.9} = 2 \times 10^{-9}$$

Buna göre 100 km mesafe boyunca contanın aşınması

$$U = IL = 2 \times 10^{-9} \times 10^8 = 0.2 \text{ mm} \text{ olacaktır.}$$

Bu teorik mülâhazaların ışığında çeşitli aşınma tiplerini bu kez de Amerikan araştırmalarında görelim.

### **A.III.5.1 YAPIŞKAN AŞINMA**

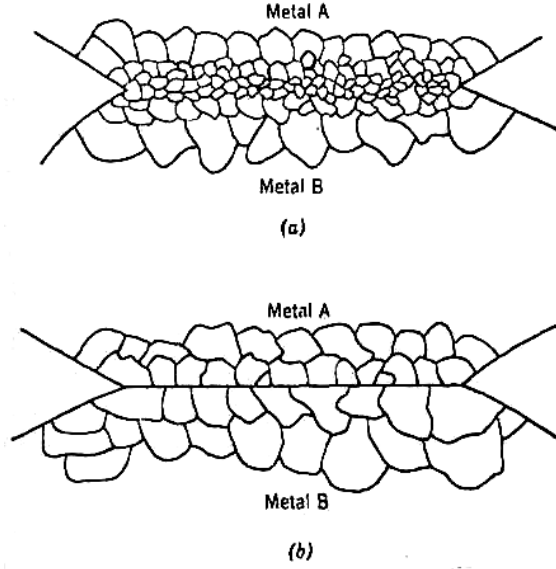
Aşınmanın en çok rastlanan şekli olan yapışkan aşınma, bir katı malzemenin başkasının üzerinde kaydığı ya da ona bastırıldığı her yerde vaki olur. Malzeme kopartılması küçük parçacıklar şeklini alıp bunlar genellikle öbür yüzeye intikal ederler ama gevşek hale gelebilirler. Parçacıkların davranışlarındaki bu farklılık, bittabi, her zaman teorik bir anlam taşır. Bir pratik konu olarak bunun önemi, kayma geometrisine bağlı olur. Örneğin, parçacık bir yolun yüzeyinde kayan bir otomobil lastiğinden ayrılmışsa bunun, lastiğin faydalı ömrü bahis konusu olduğunda, gevşek olup olmadığı veya yola intikal edip etmediğinin hiçbir önemi yoktur, şöyle ki her iki halde de lastikten kaybolmuş demektir. Ama bir muylu yatağında, bir yüzeyden öbürüne bir parçacığın intikali, daha sonraki bir aşamada parçacığın ilk yüzeye geri dönmesi halinde çoğu kez yatağın ömrüne zarar vermez; oysa ki bir gevşek parçacığın oluşması sürekli olup yatağın ömrüne ters etki yapacaktır.

Bu tefriki şöyle genelleştirmek mümkündür: intikal eden parçacıkların oluşması bir yandan öbür yana tekrarlanan bir kayma durumunda çok kez sürekli değildir ama, doğal olarak, bu tür tek bir kaymada geri dönüşsüzdür.

#### ***Yapışkan aşınmanın mekanizması***

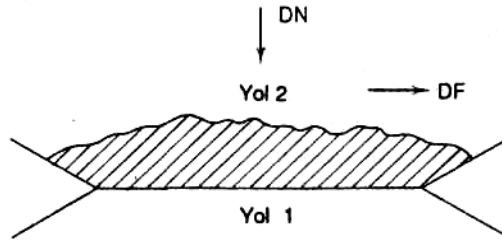
Temas eden yüzeylerin birbirlerine yapışma eğilimi, her iki malzemenin yüzey atomları arasında mevcut olan çekme kuvvetinden ileri gelir. İki yüzey birleştirilip ya dikey, ya da teğet olarak ayrılacak olursa, bu çekme kuvvetleri bir yüzeyden öbürünün üzerine malzeme çekmeye girişecek şekilde hareket ederler. Her nerede malzeme bu yolla ilk yüzeyinden kaldırılmışsa bir yapışkan aşınma parçacığı yaratılmış olur.

Yapışkan aşınma üzerinde ilk deneyler metaller üzerinde yürütülmüş ve yapışma süreci "kaynama" olarak adlandırılmıştır. Bu, bir anlamda talihsiz bir seçim olmuş şöyle ki metalürjistler "kaynama" tabirini mutat olarak yüksek sıcaklıklarda meydana getirilen metaller arasında bir birleşmeye inhisar ettirirler ve bu birleşmede, her iki metalin yüzey atomlarının başlangıç yüzey arasına yakın malzemenin difüzyon ve rekristalizasyonu vaki olur (şek. 98). Bunun tersi yapışkan aşınma durumunda gerçek temas bölgelerinde sıcaklıklar iyice aşağı olabilir ve atomik karşılıklı (Difüzyon (yayılma) ve rekristalizasyon mevcut olmayabilir. Bununla birlikte yapışkan aşınma sırasında koşullar "soğuk kaynak" takilerle tamamen aynı olup bu sonucusunda alüminyum gibi temiz bantlar birbirlerine bastırılarak (bu sırada temas eden alan şekil değiştirip yayılır) birleştirilir. Her halükârda "kaynak" kavramı kolaylıkla metal dışı malzemelerde yapışkan sürece uygulanamayacağına göre "yapışkan aşınma" terimi yeğlenecektir.



Şek. 98.- (a) Bir tipik metalürjik kaynak, (b) Bir tipit yapışkan birleşme

Bir yapışkan aşınmanın vaki oluş şekli, şek.99'da görülür; burada temas eden iki malzemenin yüzey arası şematik olarak gösterilmiştir. Cisimlerden biri bir teğetsel yer değiştirmeye zorlanmıştır. Malzemelerin yüzey arasını yarabilmek için gerekli kuvvetin, malzemelerden birinin içinden bir miktar sürekli yüzeyi yarmak için geneli olandan büyük olması halinde, kırılma sonucu yüzey boyunca vaki olacak ve intikal eden bir aşınma parçacığı meydana getirilecektir.

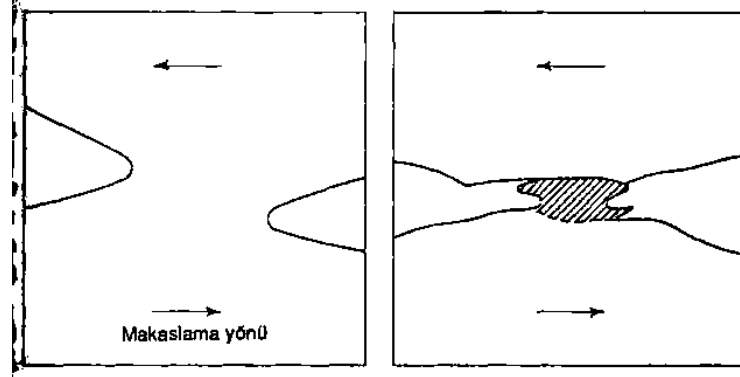


Şek. 99.- Makaslanmış bir birleşme. Birleşmede makaslama mukavemetinin yukarıdaki malzemenin kitle mukavemetinden çok büyük olması halinde makaslama, taranmış parçacığı hasil eden 2. yol boyunca yer alacaktır.

Şek. 99' un tetkiki, aşınma parçacıklarının oluşmasının nadir bir olgu olduğunu hatıra getirir şöyle ki temas eden malzemelerin başlangıç yüzey arası en küçük kesit alanını aynı zamanda bu yüzey aralarında muhtemelen çok sayıda ayarsızlık ve boşluk mevcut olduğundan en alçak mukavemeti haiz olma durumunda olur. Böylece de makaslama sırasında kırılma en kolay olarak yüzey arasında vaki olur.

Deneysel aşınma verilerine dayanan hesaplar, pratikte kayma sırasında oluşmuş birleşmelerin çok nadir olarak % 5 gibi yüksek bir oranının elle tutulabilir bir aşınma parçacığı hasil edebilecek şekilde kırıldığını göstermektedir. Oysa ki % 0,01 den küçük değerler nadir değildir.

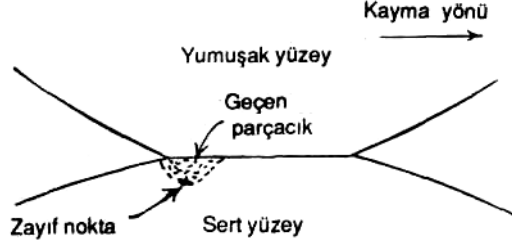
Aşınma parçacıklarının oluşma yolu Greenwood ve Tabor' un deneylerinden şematik olarak görülür; bu araştırmacılar, çıkıntılarını göstermek için çeşitli metaller ve Plasticene' den iki boyutlu modeller kullanıp sonra çıkıntılarını makaslamışlar. Bazı koşullar altında, özellikle birleşme düzleminin kayma yönüne paralel olmaması durumunda, intikal eden parçacıkların teşekkül edebileceğini göstermişlerdir (şek. 100). Bu paralellikten kaçıklık, yüzeylerin başlangıçta pürüzlü olmaları veya kayma sırasında pürüzlü hale gelmelerinden ile gelebilir. Alternatif olarak Feng' in ortaya koyduğu gibi birleşme, kayma yönüne paralel kalarak kayma etkisiyle pürüzlü hale gelirse, bu takdirde de parçacık oluşması daha kolay olabilir.



Şek. 100.- Yumuşak, iki boyutlu bakır modelle Greenwood ve Tabor' un bir parçacığın oluşmasını gösteren deneyleri.

Bununla birlikte, yapışkan aşınma parçacığının oluşması için yüzeyin mutlaka pürüzlü olmasının hiçbir surette gerekli olmadığı vurgulanmalıdır. Hattâ çok düzgün yüzeyler bile çoğu kez yapışkan aşınmaya yol açar ve birçok durumda yapışkan aşınma derecesi, yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olmaktadır.

Şek. 99' da görüldüğü gibi aşınma parçacığı oluşma modelinin mülâhazası, yüzey arasında yer almayan bütün kırılmaların, daha yumuşak malzemede, yani tarif olarak daha sert malzemeninkinden daha aşağı mekanik mukavemeti haiz olanlarda vaki olacağını gösteriyor. Bu itibarla, daha sert malzemenin değil, daha yumuşak olanınınkinden parçacıkların oluşması durumuyla karşılaşıyoruz. Bu, kesin olarak her zaman böyle değildir. Her ne kadar çoğu durumda daha çok yumuşak malzemenin parçacıklar oluşmuşsa da, bunlar genellikle daha büyük olup aynı zamanda, denenmiş bütün farklı malzemelerin kayma ya da temasında, daha sert malzemenin parçacıkların da oluştuğu bir gerçektir. Bu keyfiyet, daha sert malzeme içinde, aşağı mukavemetli yerel bölgelerin bulunduğunu hatıra getiriyor. Eğer bu, birleşmede, daha yumuşak malzemede yüksek mukavemetli yerel bölgelere tekabül ediyorsa, oluşan parçacık, daha sert malzemenin olacaktır (Şek. 101).



**Şek. 101.-** Sert yüzeyde zayıf bir noktanın nasıl bir parçacık oluşmasına götürdüğü şematik görünüşü. Sert malzeme parçacıkları genellikle küçük (birleşmeden küçük) olurlar.

Geniş ölçüde farklı sertlikte iki malzemenin göreceli aşınması üzerinde büyük bir veri kıtlığı olup mevcut olanlar ise, iki malzemenin bir  $R$  oranında sertlik farkı arz etmesi halinde aşınma derecesinin ters orantılı olarak  $R^2$  kadar değişeceğini göstermektedir. Temas eden iki malzemenin sertlik oranı ne denli artırılırsa artırılсын, daha sert malzemenin aşınmasını sıfıra indirmek mümkün olmayacaktır. Nitekim Teflon gibi yumuşak polimerler, alçak karbonlu çelik gibi kuvvetli metallardan elde tutulur miktarlarda malzeme kaldıracaktır. Daha önce de söylediğimiz gibi ayakkabı taban kösesi mermer merdiven basamağını aşındırmıyor mu?...

#### **A.III.5.1.1 Yapışkan aşınmanın nicel kanunları**

Büyük çoğunluğu metalik olan çeşitli yağlanmamış malzemelerle yürütülmüş deneylerin sonucu olarak yapışkan aşınmanın kanunlarını şöyle belirlemek mümkün olmaktadır:

1. Aşınma miktarı genellikle  $N$  yükü ile doğruca orantılıdır.
2. Aşınma miktarı genellikle kayılan  $x$  mesafesiyle orantılıdır.
3. Aşınma miktarı genellikle, aşındırılmış yüzeyin  $p$  sertliğiyle ters orantılıdır.

Veya, aşındırılan hacim

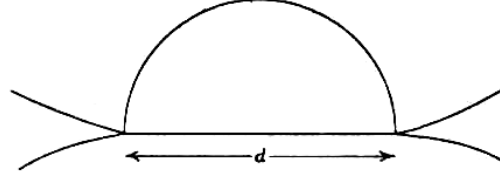
$$V = \frac{c N x}{p} \quad (1) \text{ şeklinde yazılabilir.}$$

Burada  $c$ , temas halindeki malzemelerle bunların tam temizlik derecesine bağlı boyutsuz sabitedir.

Her ne kadar birçok araştırmacı (1) denkleminin her zaman uygun düşmediğini bulmuşlarsa da bu denklem az çok bütün durumlarda deneysel verileri makul şekilde iyi temsil etmektedir.

Archard, kayma sürecinin çok makul bir modelini ortaya koymuş olup bu model (1) denkleminin kolaylıkla çıkartılmasını sağlayıp bundaki  $c$  sabitesine kesin bir mana verme olanağını vermektedir. Archard, iki çıkıntının birleşme teşkil etmek üzere her temasa gelmesi halinde bir yapışkan parçacığın oluşmasının bir sabit  $k$  Hıttimalinin (probabilitesinin) mevcut olduğunu farz ediyor. Yine her parçacığın, birleşme çapına eşit çapla bir yarıküre olduğunu varsayıyor (şek. 102).

Şimdi eğer, uygulanan bir  $N$  yükü altında kayan iki cismi dikkat nazara alıp metallerin daha yumuşağının akış basıncına  $p$  diyecek olursak,



Şek.102 Yarıküresel bir aşınma parçaçığının farazi modeli

### A.III.5.1.2 Gerçek temas alanı

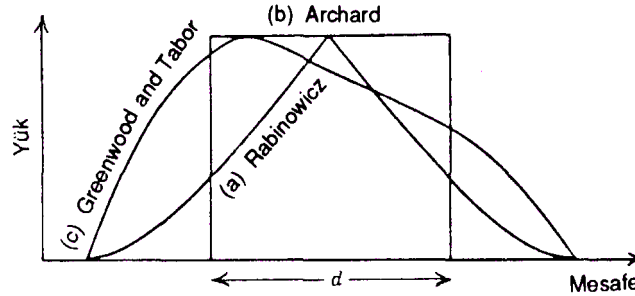
$$N = p \cdot A \quad (2) \text{ ile verilir.}$$

Bütün birleşmelerin aynı boyutta çapında daireler ve dolayısıyla  $\pi d^2/4$  alanında oldukları varsayıldığında her an mevcut olan toplam  $n$  sayısı

$$A = n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (3) \text{ olur.}$$

$$n = \frac{4 A}{\pi d^2} = \frac{4 N}{\pi p d^2} \quad (4) \text{ çıkar}$$

Her birleşmenin,  $d$  ye eşil bir mesafe kayması sırasında mevcut kaldığı, bundan sonra koptuğu ve yük taşıma kabiliyetinin yeni bir birleşmeye intikal ettiği düşünülebilir. Fiilen, şek. 103' ün gösterdiği gibi yük-yer değiştirme fonksiyonu daha çapraşık ise de bir gerçek  $d$  çalışma mesafesi iyi bir yaklaşıklık olmaktadır.



Şek. 103.- Bir birleşmenin yük-yer değiştirme fonksiyonları, (a) Rabinowicz tarafından hesaplanmış, (b) Archard tarafından varsayılmış, (c) Bir alüminyum model kullanılarak Greenwood ve Tabor tarafından ölçülmüş. Her eğrinin altındaki alan, her bir birleşme tarafından taşınan toplam yük-mesafeyi temsil edip az çok aynıdır.

Bir  $d$  fiilî çalışma mesafesi ele alınarak her birleşme, kayma santimetresi başına, toplam bir  $l/d$  kez yeniden oluşturulacaktır ve böylece de santimetre başına oluşan toplam  $S$  birleşme sayısı



$$S = \frac{n}{d} = \frac{4 N}{\pi p d^3} \quad (5) \text{ olur.}$$

Her birleşmenin bir intikal etmiş parçacığın teşekkülüne götürme ihtimalinin  $k$  ya eşit olduğu ifade edilmiş olup böyle bir parçacığın  $d$  çapında bir yarıküre olduğu varsayımıyla, kayma santimetresi başına aşınma hacmi  $SV/Sx$ ,

$$\frac{dV}{dx} = \frac{k.S.\pi d^3}{12} = \frac{k N}{3 p} \quad (6) \text{ olur.}$$

Böylece de JC mesafesi içinde kaymada oluşan intikal etmiş parçacık hacmi,

$$V = \frac{k N x}{3 p} \quad (7) \text{ olur.}$$

Bu, yapışkan aşınmanın temel kanunu ve da, aşınma katsayısı telakki edilebilir. Sürtünme katsayısı gibi  $A$ : da, boyutsuzdur. (7) denkleminin şekil itibariyle (1) denklemiyle aynı olduğu görülecektir; tek fark,  $k/3$  ün yerini itibarî  $c$  sabitesi almıştır.

Tablo 33.- Çeşitli kayma kombinasyonlarında  $k$  aşınma sabitesi

<i>Kombinasyon</i>	<i>k aşınma sabitesi</i>
Çinko üstünde çinko	$160 \times 10^{-3}$
Alçak karbonlu çelik üstünde alçak karbonlu çelik	45
Bakır üstünde bakır	32
Paslanmaz çelik üstünde pasl. çelik	21
Alçak karbonlu çelik üstünde bakır	1,5
Bakır üstünde alçak karbonlu çelik	0,5
Bakelit üstünde bakelit	0,02

Bu hesabın görünümülerinden bir tanesi,  $d$  birleşme çapının aşınma hacminin ifadesinde görünmemesi olup Archard (7) denkleminin, birleşmelerin ve bunlardan türeyen parçacıkların geniş bir boyut aralığını kaplamaları halinde bile, uygunluğunu göstermiştir. Gerçekten de parçacıkların boyutları çok değişkendir. İfade edilmesinin gerektiği, parçacık ile birleşmenin çaplarının eşit oldukları ve bu parçacık teşekkül etmesi ihtimalinin birleşme boyutundan bağımsız olduğudur. Nereden çıktığı belli olmayan üç faktörü paydada beliriyor ve bir şekil faktörü oluyor ki dairesel birleşmeler ve yarıküresel parçacık varsayımı durumunda uygulanabilmektedir. Kare birleşme ve kübik parçacık düşünülseydi, tekabül eden faktör 1 olurdu....

(1) denklemi için tek önemli gereklilik, parçacık hacminin, birleşme çapının kübüyle orantılı oluşudur. Bu gereklilik, genellikle karşılanıyor gibidir.

### A.III.5.1.3 Aşınma denkleminin alternatif şekilleri

(7) denklemini birçok eşdeğer şekilde yeniden yazmak mümkündür. Önce,  $V$  yi, derinlik ile  $A_a$  görünür temas alanının çarpımı olarak yazıp

$$h = \frac{k N x}{3 p A_a} \quad (8) \text{ olur.}$$

Sonra gerçek temas alanı  $N/p$  nin yerine konur. Bu da

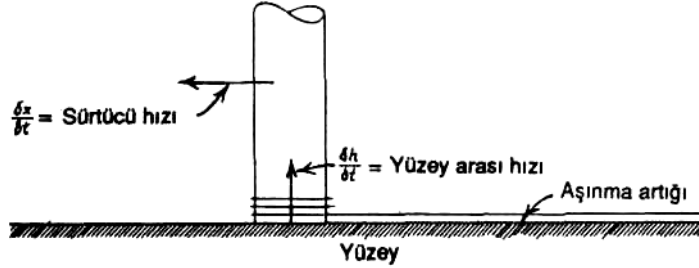
$$h = \frac{k x A_r}{3 A_a} \quad (9) \text{ olur.}$$

Bu denklem şekli,  $k$  nin boyutsuz tabiatını açıkça gösterir,  $h$  mesafesi,  $x/3$  mesafesine  $ve A_r/A_a$  kesriyle orantılıdır şöyle ki orantılılık sabitesi  $k$ , saf bir sayı olacaktır.

Plastik akış kaçınılmaz olacak şekilde sınıra yüklenmiş bir küçük sürtücü özel durumunda, gerçek ve görünür alanlar eşit olup bu, denklemi basitleştirir:

$$h = \frac{k x}{3} \quad (10)$$

Bu münasebetin özellikle basit bir manası vardır. Sürtücü yüzeyinin öbür yüzeyin içine doğru aşınmasının sonucu olarak "yürüme" hızı, kayma hızının  $k/3$  katıdır (şek. 104).



Şek. 104.- Sınıra yüklenmiş sürtücü için, yüzey arasının sürtücünün içine doğru hızı, sürtücünün yüzey boyunca hızının  $k/3$  katıdır.

Alternatif olarak (7) denkleminden hareket edip  $N/p$  yerine  $A_r$  gerçek temas alanını koyarak

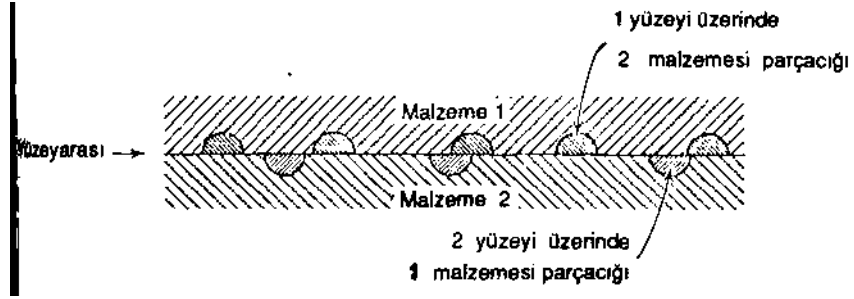
$$V = \frac{k A_r x}{3} \quad (11) \text{ elde edilir.}$$

Bu denklem elektriksel direnci belirtilmiş bir değişim altında ve dolayısıyla  $A_r$  değerinin belli bir değere eşit ya da bunun üstünde tutulacak olan kayma sistemlerinde önemli olmaktadır. Bu durumda aşınma derecesi sadece  $k$  ya bağlı olup sertlik ve yük parametresinin  $k$  aşınma sabitesini saptaması halinin dışında, sertlik ve yükten bağımsız olmaktadır. Örneğin, belli bir metalde bunun taşlanmış veya sertleştirilmiş hallerinde  $k$  aşınma sabitesi aynı ise ve elektrik akımı taşıma kapasitesi amacıyla belli bir  $A_r$  değerinin tutulması gerekiyorsa, metalin yumuşak ya da sert halde kullanılması bir şeyi değiştirmemektedir, şöyle ki sabit  $A_r$  için aşınma derecesi

her ikisinde de aynı olacaktır. Bununla birlikte sürtünme kuvveti,  $s A_r (=F)$  daha az olacağından, daha yumuşak malzeme kullanıldığında daha küçük olacaktır. Mamelül bu husus hâlâ bir tartışma konusu olmaya devam etmektedir.

### ***Gevşek tutulmuş parçacıkların denge hesapları***

1 malzemesinin, aynı sertlikte 2 malzemesi üzerinde kaydığını; 1 malzemesinin bir ( $a_1$ ) ve 2 malzemesinin bir ( $a_2$ ) bölümünün öbür malzemenin parçacıklarıyla kaplı olduğunu; ve 1 ve 2 malzemelerinin tüm parçacıklarının aynı boyut ve şekilinde olduklarını farz edeceğiz (şek. 105). Daha sonra  $p$  yi, temas başına,



Şek. 105.- intikal (transfer) süreci dengesinin şematik gösterilişi

1 malzemesinden 1 malzemesine,  $q$  yü temas başına 2 malzemesinden 2 malzemesine intikal ihtimali (probabilitesi);  $r$  yi, temas başına 1 malzemesinden 2 malzemesine,  $s$  i' de temas başına 2 malzemesinden 1 malzemesine intikal ihtimali olarak tanımlayalım.

1 malzemesi parçacıklarının II yüzeyine geliş ölçüsü, oluşmuş ( $S$ ) toplam birleşime sayısının 1 malzemesi olan I yüzeyinin bölümü,  $(1 - a_1)$ , 2 malzemesi olan II yüzeyinin bölümü,  $(1-a_2)$  ve bir temasın bir parçacık hasıl etme ihtimali ( $r$ ) ile

çarpımına eşittir. Aynı şekilde 1 malzemesinden parçacıkların II yüzeyini terk etme derecesi yine  $S$  in 1 malzemesinin II yüzeyinde konsantrasyonu ( $a_2$ )1 malzemenin I yüzeyinde konsantrasyonu  $(1-a_1)$  ve uygun probabilitate faktörü ( $p$ ) ile çarpımına eşittir. Şu halde denge için

$$S (1 - a_1) (1 - a_2) r = S (a_2) (1 - a_1) p \quad (12)$$

yazıyoruz. Buradan da

$$a_2 = \frac{r}{p + r} \quad (13) \text{ olur.}$$

Aynı şekilde ,I yüzeyine 2 malzemesi akımını tetkik ederek.

$$a_1 = \frac{s}{q + s} \quad (14) \text{ elde edilir.}$$

Bu denklemler türetilirken, intikal etmiş olan parçacıkların öbür metalde çok sıkı tutulmadıklarının ve bunların daha başka yeni parçacık koparamadıklarının farz edilmiş bulunduğu kaydedilecektir. Parçacıkların yeni parçacıklar oluşmasına götürme durumları daha sonra irdelenecektir.

$p$  den  $s$  e sabiteleri hesaplarken küçük kayma mesafeleri üstünde elde edilen, yani her iki yüzeyin mukabil yüzey parçacıkları tarafından bulaştırılmalarının ileri gitmesinden önceki intikal verileri kullanılacaktır. Örneğin çelik üzerinde kayan bakır durumunda, Tablo 33' de verilmiş aşınma sabiteleri  $p=320$ ,  $q=450$ ,  $r=15$  ve  $s=5$  (hepsi  $10^{-4}$  birimi ile) dir. Buradan  $a_2$  ve  $a_1$  in değerlerini sırasıyla % 4,5 ve % 1,1 olarak hesaplıyoruz. Her ne kadar hesaplarda yaklaşıklıklar ağır ise de  $a_1$  ve  $a_2$  nin değerlerinin, hiç değilse bir büyüklük mertebesi içinde, doğru oldukları kabul ediliyor.

Tablo 34, yukarıdaki malzeme kombinasyonları ve başka tipik kayan malzemeler için  $a$  nın hesaplarını gösterir.

(13) ve (14) denklemlerine göre dengenin görünümü sadece  $p$  den  $s$  e aşınma sabitelerine bağlıdır ancak bu sonuncular yük, hız ve yüzey geometrisinden bağımsız kabul edilmişlerdir. Kerridge' in bir yumuşak çelik sürtücünün bir sert çelik silindir üzerinde kaydırılması deneyleri,  $a_1$  in, uygulanan yüke bağlı olmadığını şaşırtıcı şekilde doğrulamıştır. 1 malzemesinin yumuşak çelik ve 2 malzemesinin bir takım çeliği olduğu bir sistemi kullanarak, yük 10 kat değiştirilerek silindire den-

gede yapışmış parçacıkların ağırlığının % 30' dan az değiştiğini göstermiştir. Keza verileri, (14) denkleminin bir doğruca denemesini sağlamıştır. Kayan yüzeyinin alanı  $4 \text{ cm}^2$ ; intikal hacmi  $10^{-4} \text{ cm}^3$  olmuş. Bir parçacığın çapının  $10^{-3} \text{ cm}$  olduğu varsayılarak (makul bir değer)  $a_1 = \% 2,5$  verir. Verilerinden  $s$  in  $5 \times 10^{-4}$  olduğunu tahmin ederiz. Yukarıdaki gibi  $q = 450 \times 10^{-4}$  alınabilir. Böylece (14) denkleminde  $a_1 = \% 1,1$  bulunur.

Bütün gayri muayyenlikler karşısında bunun fiilî % 2,5 değerine yakın olduğu kabul edilir.

**Tablo 34: Çeşitli metal kombinasyonları parçacıklarının intikal konsantrasyon dengesi**

Parçacıklar	Yüzey	Denge konsantrasyonu (%)
Plastik	Gümüş	0,3
Kadmium	Çelik	0,6
Çelik	Bakır	1,1
Platin	Çelik	3,7
Çelik	Titanium	4,3
Bakır	Çelik	4,5
Titanium	Çelik	29,0

### *Sıkıca tutulan parçacıklar için denge hesabı*

Şimdi, o denli sıkıca tutulmuş ki başka parçacıkları kendileri üzerine koparabilecek parçacıklar durumuna geliyoruz. Bu, (12) ilâ (14) denklemleri içine yeni olgular getiriyor.

Şek. 105' e dönelim: 1 malzemesinin II yüzeyi üzerindeki parçacıkları 1 malzemesinden II yüzeyine daha başka parçacıklar çekebiliyorlarsa, (12) denkleminin sol tarafına  $S(a_2)(1-a_1)p$  yi eklemeliyiz. Eğer I yüzeyi üzerinde 2 malzemesinin parçacıkları II yüzeyinden 1 malzemesi parçacıkları çekebiliyorsa,  $S(a_2)(a_1)r$  ifadesini sağ tarafa ekleyeceğiz. Böylece

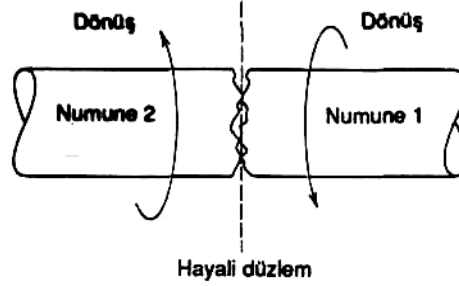
$$S(1-a_1)(1-a_2)r + S(a_2)(1-a_1)p = S(a_2)(1-a_2)p + S(a_1)(a_2)r \quad (15)$$

elde edilir. Veya

$$a_1 + a_2 = 1 \quad (16) \text{ olur.}$$

$a_1$  ile  $a_2$  arasındaki aynı münasebetin, 2 malzemesinin parçacıklarının dikkat nazara alınmalarıyla açıkça elde edilecektir ve dolayısıyla  $a_1$  ile  $a_2$  ayrı ayrı saptanamaz. Bununla birlikte bunlardan en az birinin 1/2 ve üstünde olması gerekir. Pratikte bunlardan biri mutad olarak 1, öbürü de sıfırdır; seçim kısmen tesadüfi, kısmen de yüzey geometrisinden olur. Aşağıda göreceğimiz gibi bir küçük sürtücü geniş bir düz yüzey üzerinde kaydırıldığında, parçacıkların başlangıç yoğunlaşması normal olarak sürtücü üzerinde daha çok olacaktır şöyle ki bu, büyük ihtimalle, öbürünün parçacıklarıyla tamamen kaplanan yüzey olur.

Aynı boyut, şekil ve malzemedeki numuneler arasında intikalde, bunlardan birinin yüzeyine bir düzlem çizilirse (şek. 106), I yüzeyine her parçacık intikalinde de, aynı şekilde, sola yürür. Aşınma, gelişigüzel bir olgu olduğundan düzlemin pozisyonu da gelişigüzel değişir, işbu gelişigüzel karışıklıklar sırasında düzlemin



Şek. 106.- Simetrik aşınma sorunu.

pozisyonunun bulunması sonucu Einstein' m (1905), partiküllerin Brow hareketleri için tartışmasındakinin aynıdır; sonuç şudur ki, genellikle düzlem, başlangıç pozisyonundan (süre)<sup>1/2</sup> gibi bir miktar mesafede olur. Böylece de, uzun bir kayma süresinden sonra ayırım çizgisinde hepsi numunelerden birine geçmiş olması daha muhtemeldir şöyle ki  $a_1$  ve  $a_2$  den biri sıfır, öbürü de 1 olur.

***Bir parçacık takımının sıkıca, öbürünün gevşek olarak tutulması halinde denge hesabı***

Bu, daha önce irdelediğimiz aşamalar arasında bir orta basamak olarak düşünüle-bilip, genellikle malzemelerden birinin öbüründen çok daha sert olması halinde vaki olur. iki tip parçacık tipinin her biri, aynı yapışkan çekim tarafında tutulur ki bu çekim, malzeme 1 - malzeme 2 etkileşime bağlanabilir ve daha zayıf malzeme (malzeme1) nın mukavemetine kıyasla "büyük" ama daha sert malzeme 2 ninkine göre "küçük" olur. 1 malzemesine yapışmış 2 malzemesinden parçacıkların 1 yüzeyinden parçacık koparamaması ama 1 malzemesinin parçacıklarının daha çok parçacık koparabilmesi halinde (16) denklemi bir yüzey için, ama öbür yüzey için tekabül eden denklemin sadece üç terimi kullanılır. Bu sonuncu münasebet, buna göre

$$S(1-a_2)(1-a_1) s = Sa_1(1-a_2) q + Sa_2 a_1 s \quad (17)$$

Şeklini alır. Bu da

$$(1 - a_1 - a_2) s = a_1 (1 - a_2) q \quad (18)$$

olarak basitleşir ve (16) denklemiyle birlikte

$$a_1 = 0$$

$$a_2 = 0 \quad (19) \text{ verir.}$$

Buna göre bu etkileşim tipinin sonucu, sert yüzeyin tamamen yumuşak malzeme parçacıktan ile kaplı olduğu, ama hiç bir sert malzeme parçacığının yumuşak malzeme üzerinde bulunmadığıdır. Bu sonuncu durum, önceki bahiste irdeleneninki ile aynıdır. Orada her iki yüzeyin öbürünün parçacıklarıyla tamamen kaplı olabileceğini bulmuştuk. Şimdi ise, farklı sertlikte değişik malzemelerde, daha sert yüzeyin

daha yumuşağının parçacıklarıyla kaplandığını buluyoruz. Tersî varit olmuyor.

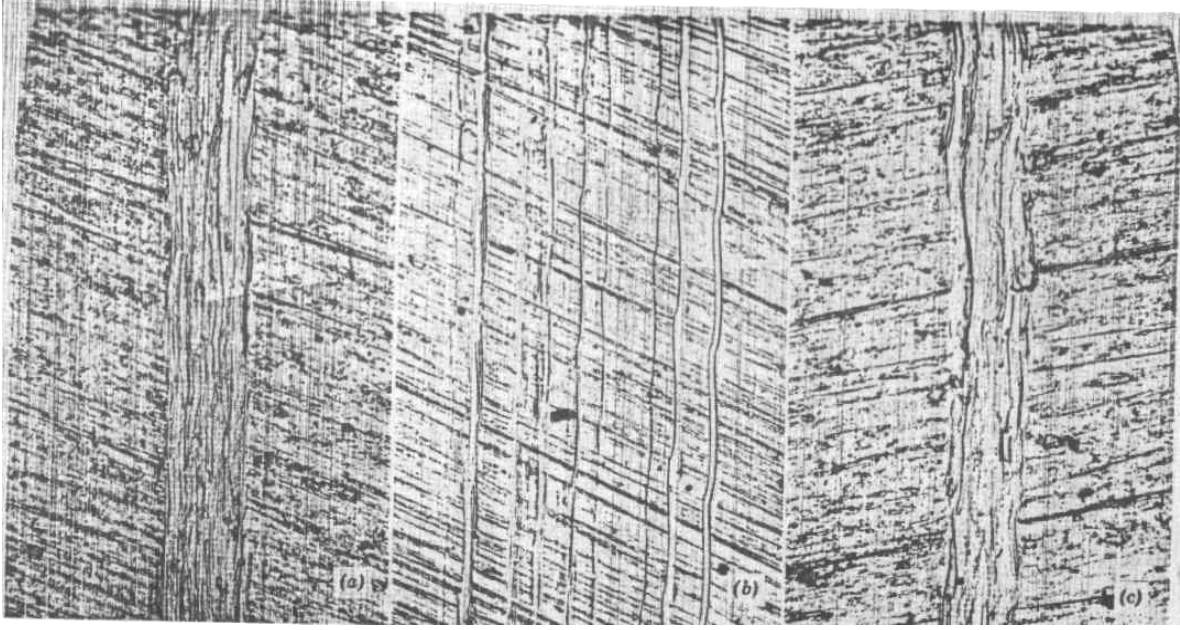
***Başlangıç intikal dereceleri - Dengede olmayan yüzeyler***

Yukarıdaki irdeleme, kayan yüzeylerin denge halinin bulunmasına hasredilmiştir. Yine önemi olan bir başka sorun da bu dengeye hangi yolla varıldığı, ve özellikle, iki yüzeyin kaymasının ilk başladığı zaman nelerin vaki olduğudur. Birlerin oluşmasının derecesi  $dS/dt$  şeklinde yazılırsa, 2 yüzeyi üzerinde parçacıkların oluşma derecesi ( $r \times dS/dt$ ) olup 1 malzemesi üzerinde parçacıklar ( $s \times dS/dt$ ) ölçüsünde teşekkül edecektir. Malzeme 1 ve malzeme 2 nin aynı mukavemeti haiz olmaları halinde  $r$  ile  $s$  aynı büyüklük mertebesinde ve dolayısıyla da intikal, aynı büyüklük mertebesinde olacaktır.

Bunun sonucu olarak, yüzeylerden birinin ötekenden çok daha küçük (yani  $A_a$  görünür yüzeyi daha küçük) olması halinde, bu yüzey, öbürünün parçacıklarıyla çok daha hızlı derecede örtülecektir. Birçok sistemde, yüzeyin yaklaşık % 10' u öbürünün parçacıklarıyla kaplanır kaplanmaz, bu parçacıklar birbirlerine yeterince yakın olurlar şöyle ki, yapışık buldukları yüzeye daha da parçacık intikal ettirmede işbirliğinde bulunabilirler. Ve bir yüzeyin %10 kaplanması halinde bu yüzey fiilî olarak "gevşek tutulan parçacıklar" halinde "sıkı tutulan parçacıklar" kategorisine geçer. Bu kategoriler bundan önceki bahislerde tanımlanmışlardı. Böyle olunca da, daha küçük yüzey %10 kaplanmaya daha önce varacağından, öbürünün parçacıkları ile kaplanan, daha küçük yüzey olacaktır. Bu, şek. 107' de görülür. Foto-mikrograflar bir titanium sürtücünün bir titanium düzlem, bir titanium sürtücünün bir çelik düzlem ve bir çelik sürtücünün bir titanium düzlem üzerinde kaymalarını gösterirler. Titanium düzlem üzerinde çelik sürtücü hızla bir titanium üstünde titanium durumunu hasıl eder; oysa ki bir çelik düzlem üzerinde titanium sürtücü hızla bir çelik üstünde çelik durumunu meydana getirir. Burada olduğu gibi, teması çok küçük bir alan üzerinde olan yarıküresel üçlü sürtücülerde, bu tam kaplama, 0,2 cm kadar az olabilen küçük bir kayma mesafesinde hasıl olur.

Çelik-titanium sisteminde, kaplanma derecesinde bu fark büyük pratik önemi haiz olur şöyle ki çelik üzerinde çelik sistemi kolaylıkla yağlanır, oysa ki titanium üzerinde titanium sistemi ancak zorlukla yağlanabilir ve bu da hiçbir zaman iyi olmaz. Bu özellikler, sırasıyla, çelik üstünde titanium ve titanium üstünde çelik sistemlerine taşınır. Böylece cetane içinde palmitik asitle yağlanmış bir titanium düzlem üzerinde kayan bir çelik sürtücü, 0,48 lik bir sürtünme (titanium üstünde titanium dakinin aynı değeri) verir,ama aynı şekilde yağlanmış bir çelik üzerinde bir titanium sürtücü çelik üzerinde kayan çelikle aynı değeri 0,09 verir.

Sonuç olarak başka malzemelere karşı titanium kayma sistemleri tasarlanırken titanium yüzeyinin çok daha küçük tutulması önemli olmaktadır. Örneğin bir pistonsilindir kombinasyonunda piston titaniumdan olup yüzey alanı mümkün olduğu kadar azaltılacaktır.



Şek. 107.- Aşınma izleri: (a) bir titanium düzlem üzerinde kayan bir titanium sürtücü; (b) 1020 çelik düzlem üzerinde kayan bir titanium sürtücü; (c) bir titanium düzlem üzerinde kayan bir 1020 çelik düzlem. Büyütlme x 130. Yük 100 gr. Yağlayıcı yok. (c) deki çelik sürtücü titanium parçacıklarla kaplandığından (a) ve (c) mikrografları birbirlerine benzemektedirler.

### ***Bir malzemenin parçacıklar tarafından tam kaplanmasına götüren faktörler***

Yukarıdaki bahislerde bir yüzeyin öbür malzemenin parçacıkları tarafından tam kaplanmasının iki nedene dayandığını görmüştük.

1.)(13) denkleminin verdiği parçacık yoğunlaşması yaklaşık %10' dan büyüktür.

2.)Başlangıçta intikal eden parçacıklar sıkı tutulmakta olup daha fazla parçacık ko-partabilirler.

Bu faktörlerin ilki açıkça  $r/p$  nin bir yüksek değeri dolayısıyla olup burada  $r$ , malzemenin öbür yüzeye intikal ihtimali,  $p$  de malzemenin kendine intikal ihtimalidir. Genellikle  $r/p$  nin yüksek değerleri, kayan malzemeler arasında kuvvetli bir çekimin var olduğu sistemlerde meydana gelir. Nicel olarak bu kuvvetli çekime, yapışma enerjisi  $W_{ab}$  nin bir yüksek değerinden çıkmış gibi bakılabilir.  $W_{ab}$  nin az çok  $W_{aa}$ , yani yüzeylerden birinin kohesion (bağlantı) enerjisi kadar büyük olması halinde  $a$  yüzeyinin  $b$  nin aşınma parçacıkları tarafından kaplanması muhtemel olur. işin içine nicel olarak dalmadan,  $W_{ab}$  nin büyüklük olarak  $a$  malzemesinin kendine yapışma işi  $W_{aa}$  ile kıyaslanabilir olması halinde,  $p$  ile  $r$  de aynı büyüklük mertebesinde olmaları muhtemeldir; bu nedenle  $r/(p + r)$  kolayca % 50' ye varabilir. Benzer bileşikte malzemeler, örneğin fosfor bronz ile berilyumlu bakır gibi aynı metalin farklı



alaşımları çoğu kez bu etkiyi sergiler, tıpkı sert yüzeylere sürten yumuşak malzemelerin yaptıkları gibi; bu sonuncularda sert malzemeye karşı yumuşak malzemenin  $W_{ab}$  sisteminde, daha yumuşak malzemenin  $W_{aa}$  sını iyice geçebilir.

Bu, örneğin plastiklerin metaller üzerine, yumuşak metallerin daha sert metaller üzerine olduğu gibi, yumuşak malzemelerin daha sert malzemeleri bulaştırıp kaplama eğiliminin oluşma yolunu izah eder.

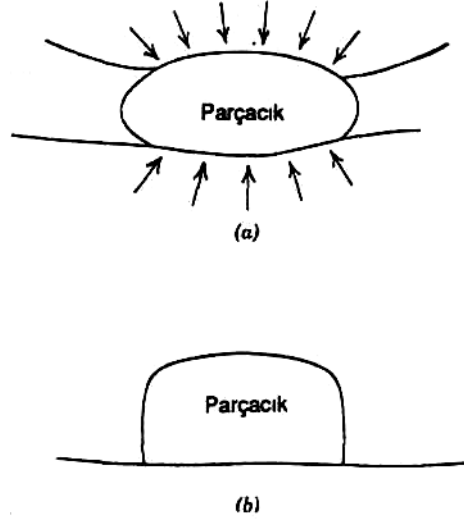
Parçacıkların daha sonra yeni parçacıkların intikalini sağlayacak şekilde altyapılarına sıkıca yapışmalarından ileri gelen tam kaplamaya götüren ikinci faktöre gelince,  $W_{ab}/p$ , yüzey enerjisinin sertliğe oranının yüksek olması halinde bunun gerçekleştiğini göreceğiz.

Böylece de her iki kriter tamamen eş olmaktadır şöyle ki  $W_{ab}$  nin bir yüksek değeri, parçacıkların kuvvetli yapışmasının birinci koşulunu oluşturmaktadır.

### ***Gevşek aşınma parçacıklarının oluşması***

Buraya kadar irdelemiş olduğumuz aşınma süreci, yapışkan aşınma parçacıklarının oluşumunu betimlemeye yönelikti. Bununla birlikte her gün önümüze çıkan şey de, iki yüzeyin kaymasının genellikle sistemde malzeme kaybına götürdüğüdür; o halde gevşek parçacıklar ortaya çıkmış olacaktır. Yapışkan aşınma süreci arasında gevşek parçacıkların oluşması bir görünürde tezadı tazammun ettiriyor şöyle ki başlangıçta yapışkan parçacıkların meydana getirilmesi, parçacıklarla üzerine intikal ettikleri yüzey arasında kuvvetli bir bağlantıyı peşinen farz ettirir. Oysa ki nihaî gevşek parçacık oluşumu, öbür yandan, zayıf bir bağlantıyı tazammun eder. Gevşek parçacıkların teşekkülü çoğu kez, yapışkan parçacıklarda kimyasal değişimin bir sonucu olmaktadır. Böylece, kayma sistemimiz çeliği içeriyorsa, yapışkan çelik parçacıklar oluşacaktır. Bu parçacıklar oksitlenmeye, başlıca  $Fe_2O_3$ ' e dönüşmeye eğilimlidir ve bu oksit, gevşektir. Bunun üzerine çelik parçacıkların bağlı oldukları yüzey, yeni çelik parçacıklarının intikaline açık hale gelir. Bu iki kademeli süreçte gevşek tanecikler öbür kayan yüzeye yapışan parçacıklardan oluşur ve gevşek parçacıklar doğruca kayan yüzey kitlesinden doğruca oluşmaz.

Daha genel bir ikinci, çoğu kez gevşek parçacıklar hasil etme yönünde iş gören mekanizma, yapışkan parçacıkların bakiye elastik enerjisini tazammun eder. Yüzeyde bir parçacığa göz attığımızda (şek. 108), bunun öbür yüzle temasta olduğu

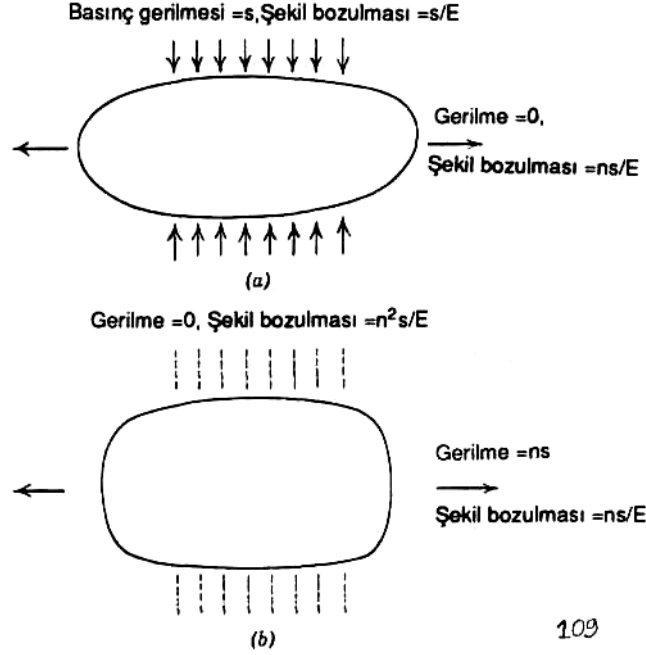


**Şek. 108.- Yüksek gerilme altında oluşmuş bir tipik, (a) parçacığı; (b) öbür yüzeyin çekilmesinden sonra. Bakiye gerilmeler kalarak parçacık ve altyapıyı uygunluk içinde tutarlar. anda ağır gerilme ve şekil bozulması durumunda olduğunu görürüz; mamafih**

öbür yüzey kalkınca, sadece bakiye gerilme ve şekil bozulması kalır. Bu, parçacık ve alt tabakasının, karşılıklı temas ettiği yüzeye geometrik olarak uymaya devam gereğinden doğar. Bir parçacığın gevşek hale gelmesi için, oluşması sırasında içinde birikmiş olan elastik enerjinin, onu altyapısına bağlayan yapışma enerjisine eşit ya da bundan büyük olmalıdır. Genellikle bir parçacık, daha küçük parçacıkların topaklanmaları suretiyle oluştuğunda, elastik enerjisi, yapışma enerjisi kadar büyük olur olmaz gevşekleşir.

Bir düz üçlü çıkıntının bir başka yüzey üzerinde kaydığı, bir noktada yapıştığı ve çıkıntı içinde makaslamanın vaki olduğu şöyle ki bir parçacığın teşekkül ettiği bir model farz edelim (şek. 109).

Parçacık henüz çıkıntıya bağlı iken, bir yüksek basma gerilmesi taşır ve bunun sonucu olarak da öbür iki yatay yönde genişleme şekil bozulması vaki olup bunların her birinin büyüklüğü  $va/E$  kadardır; burada  $v$ , Poisson oranı;  $a$ , dikey basma gerilmesi;  $E$  de Young modülüdür.



Şek. 109.- Bir parçacığın varsayımsal ve ileri ölçüde basitleştirilmiş gerilme ve şekil bozulmasının resmi. (a) oluşma anında; (b) dikey basma gerilmesi kaldırıldıktan sonra

Parçacık teşekkül edip dikey gerilme kalktıktan sonra yatay şekil bozulmaları kalacaktır zira yüzey arasında yapışma, parçacığın büzülmesini önleyecektir. Böylece de,  $va$  büyüklüğünde bakiye gerilmeler hasil olacaktır. Başlangıç dikey gerilmenin malzemenin  $a$  akma gerilmesi olduğu kabul edildiğinde, bakiye gerilmeler

$v\sigma$  ve  $y$  olup bu akma gerilmesi, malzemenin plastik akma olmadan taşıyabileceği maksimum gerilmedir.

Bu mülâhazanın, çıkıntıda hasil olup bir parçacığın oluşmasına götüren olayların aşın basitleştirilmiş modeline dayandırılmış olduğu takdir edilecektir. Mamafih bakiye gerilme için ifademizin gerçeğin uzadığında olmadığına inanılmaktadır.

Aşınma parçacığının bir yarıküreye yaklaşan bir şekli haiz varsayıldığında, içinde birikmiş  $E_e$  elastik enerji

$$E_e = \left( \frac{v^2 \sigma_y^2}{2E} \right) \left( \frac{\pi d^3}{12} \right) \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir.

Yüzey arasında etki yapan  $E_a$  yapışma enerjisi de

$$E_a = W_{ab} \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (21)$$

olur burada  $W_{ab}$  temas eden malzemelerin yapışma işidir.

$E_c > E_a$  ise bir parçacık ayrılabilir şöyle ki parçacığın kalkması bir bütün olarak sistemin serbest enerjisini minimuma indirecektir.

Bu koşulu uygulayarak

$$d \geq \frac{6 E W_{ab}}{v^2 \sigma_f^2} \quad (22) \text{ elde edilir.}$$

Büyük çoğunlukla, özellikle dikey yükün küçük olduğu sistemlerde, başlangıçta intikal etmiş aşınma parçacıklarının, denkleme uyamayacak kadar küçük oldukları bulunmuştur. Buna karşılık, intikal etmiş aşınma parçacıkları daha sonra meydana gelen aşınma döküntülerinin ilâvesiyle irileşir; bu irileşme yeterli büyüklükte bir aşınma parçacığı oluşana kadar sürer. Bu tür bir sistemde (22) denklemi doğruca bir eşitlik olur.

(22) denklemi,  $v^2$  nin birçok malzeme için 1/10 civarında olduğu, ve yine  $\sigma_f$  in  $p$  nüfuziyet sertliğinin yaklaşık 1/3 ü olduğu kaydedilerek basitleştirilebilir ( $p$  nüfuziyet sertliği, akma mukavemetine göre daha kolay ölçülebilir). Bunların ötesinde,  $\sigma_f/E$  birçok malzemede açıkça basit olup ortalama değeri yaklaşık  $3 \times 10^{-3}$  dür. Böylece, gevşek parçacık oluşumu için koşulumuz

$$d = 60.000 \frac{W_{ab}}{p} \quad (23)$$

şeklini alır.

Bu, ölçülebilir bir nicelik (gevşek aşınma parçacıklarının çapı) ile hiçbir bilinmez niceliği tazammun etmeyen  $p$  ile  $W_{ab}$  arasında bir münasebet olup dolayısıyla deneysel olarak tahkik edilebilir.

(23) denklemi mutad dışıdır şöyle ki bunda görülen boyutsuz sabite, şaşırtıcı şekilde büyüktür.  $W_{ab}/p$  yi elde etmek için  $d$  nin çarpılmasının gerektiği 1/60.000,  $v^2$  yi temsil eden bir 1/10 faktörü, enerji ifadesi için bir 1/2 faktörü; bir yarıküresel parçacık için bir 1/3 şekil faktörü ve  $\sigma_f/p$  oranına tekabül eden bir 1/3; ve nihayet maksimum elastik şekil bozulmayı temsil eden bir 1/333 faktöründen oluşmuştur. Bu birbiri ardından çarpımlar dolayısıyla küçük  $W_{ab}/p$  mesafesi bir niceliğe, ezcümle aşınma parçacığı çapına genişler ki bu çapı önemli boyuta varır.

Parçacığın boyut denkleminin deneysel tahkiki üzerine yayılmayacağız

### ***Gevşek parçacık oluşumu için asgari yük***

Sürtünmenin plastik deformasyon teorisine göre  $(A_r = \frac{N}{p})$

$$N = A p$$

olup burada  $N$ , toplam dikey yük ve  $A$  da, gerçek temas alanıdır. Tek bir  $d$  çaplı dairesel birleşmenin tüm yükü taşıması sınır halinde

$$N = \frac{\pi d^2 p}{4} \quad (24) \text{ olur.}$$

Şimdi, yük küçükse, birleşmenin çapı küçük olacak, kendisine deformasyon elastik enerjisi verilen birleşmeye yakın bölge küçüktür ve birleşmeden oluşabilecek herhangi parçacık küçüktür. Ancak, bir gevşek aşınma parçacığının bir asgari boyutu vardır ve dolayısıyla parçacığın kendisinden oluştuğu bir birleşmenin tekabül eden bir minimum yükte birlikte, bir minimum boyutu vardır.

Ortalama aşınma parçacığı boyutu (23) denklemiyle verilir, ancak pratikte parçacıkların boyuttan yana az çok 3 faktörü kadar ortalamadan saptıkları görülmüştür şöyle ki  $d_{\min}$  minimum parçacık çapı

$$d_{\min} = 20.000 \frac{W_{ab}}{P} \quad (25) \text{ yazılabilir}$$

Şimdi (24) denklemindeki  $d$  ile (25) deklemindeki  $d_{\min}$  u eşitleyecek olursak

$$N_{\min} = \pi \times 10^8 \frac{W_{ab}^2}{P} \quad (26) \text{ elde edilir.}$$

Bu, çapı minimum aşınma parçacığınıninkiyle aynı olan bir dairesel temas alanı meydana getirecek yükü temsil eder.

Saf asil metallerde (altın, gümüş, platin) işlenme sertleşmesi halinde  $p$ , 120 kg/mm<sup>2</sup> veya 1,2x10<sup>10</sup> dyne/cm<sup>2</sup>,  $W_{ab}$  de 1000 erg/cm<sup>2</sup> civarında bulunur. Böylece

$$d_{av} \left( = 60.000 \frac{W_{ab}}{P} \right) = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$d_{\min} \left( = 20.000 \frac{W_{ab}}{P} \right) = 1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$N_{\min} \left( = \pi \times 10^8 \frac{W_{ab}^2}{P} \right) = 25 \text{ gr.}$$

Deneyssel olarak saptayabildiğimiz yüzey enerjisi kavramının kullanılmasıyla meydana çıkan bir başka sonuç vardır. Önce, asil metaller birbiri üzerinde kaydırıldıklarında altında hiçbir aşınma parçacıklarının oluşmayacağı (dolayısıyla de hiçbir topluca ağırlık kaybının vaki olmayacağı), yüzeyler arasında birinden ötekine intikal eden parçacıkların olabilmesine rağmen bir asgari yük peşinen tahmin edilir.

ikincisi, asgari yük 25 gr. civarında olacaktır.

Deneyssel çalışmalar, altın üzerinde altın için gerçekten bir asgari yük mevcut olup bunun altında, kayan numunelerde hiçbir topluca ağırlık kaybı olmadığını ve hattâ uzun süreli (2 haftaya kadar) kaymalarda bile aşınma parçacıkları oluşmadığını göstermiştir. Fiilî asgari yükün, 25 gr öngörülmüş olmasına karşın 5 gr olduğu saptanmıştır.

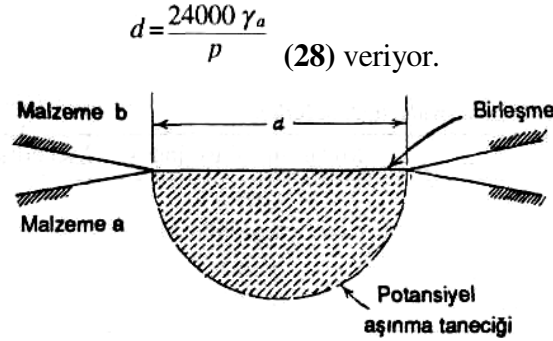
Bu farkın nereden doğduğu tam açık değilse de bunun asil metallerde sürtücünün ucunda meydana gelebilen parçacık yığılmaları nedeniyle olabileceği düşünülmektedir; bu parçacıklar gerçek temas alanından haylice büyüktür.

### ***İntikal eden parçacıkların boyutu ve intikal için gerekli asgari yük***

Sürtücünün ucundaki yığılmalar aşınma süreci modelimizi bozduğundan (bunlar, yarıküresel parçacıklara göre çok daha büyük elastik enerjinin yapışma enerjisine oranına sahiptirler) bu yığılmaların hangi koşullar altında oluştuğularının hesabına girişmeliyiz. Yığılmalar, intikal etmiş yapışkan parçacıklardan oluştuğundan bir parçacığın intikali (transferi) için gerekli koşulu tespit etmeliyiz (bir yığılmanın oluşumu için gerekli ama yeterli olmayan süreç). Şek. 110, yapışkan aşınma sürecinin bir mümkün modelini göstermekte olup burada  $a$  ve  $b$  malzemeleri arasında bir birleşmenin oluştuğu ve görüldüğü gibi bir yarıküresel parçacığın oluşmak üzere olduğu anlaşılıyor. Parçacık oluşması için koşulun, yarıküre içinde bulunan toplam elastik enerjinin en az, yarıkürenin yüzey enerjisine eşit olduğunu farz ediyoruz. Yani

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_y^2}{E} \cdot \frac{\pi d^3}{12} = \pi \frac{d^2}{2} \cdot 2 \gamma_a \quad \text{veya} \quad d = \frac{24 \gamma_a E}{\sigma_y^2} \quad (27)$$

Daha önce olduğu gibi (22 ve 23 denklemleri);  $\sigma_y/E = 3 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma_y = p/3$  farz ediyoruz. Bu da



Şek. 110. intikal etmiş bir parçacığın oluşmak üzere olduğu bir birleşmenin modeli

(28) denkleminin, elastik hacim enerjisinin, parçacıkların yüzey enerjisine dönüştürüldüğü her süreçte esasla doğru olduğu kolaylıkla görülür. En basit halde  $1 \text{ cm}^3$  hacimde bir cisimde, maksimum elastik enerjisi verilip sonra  $d$  çapında küplere parçalanmış olduğunda

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_y^2}{E} = \frac{6 \gamma_a d^2}{d^3} \quad (39)$$

$$d = \frac{12 \gamma_a E}{\sigma_y^2} = \frac{12000 \gamma_a}{p} \quad (30) \text{ elde edilir ki bu}$$

(28) denkleminde sadece bir ya da iki faktörle fark eder

### ***Yapışkan aşınma durumlarında kullanılacak malzemeler***

Başlıca ilgimizin büyük çoğunlukla aşınma miktarını azaltmak olduğu durumlarda malzememizi (7) denklemine göre seçeriz;  $k$  nın değerlerinin genel çerçevesi, Tablo 35' de verilmiştir.

Bu veriler, aşağıdaki kaideleri telkin eder:

- 1.)Sert malzemeler kullanılacak
- 2.)Alçak etkileşimli malzemeler kullanılacak : ya  $W_{ab}$  nin bir alçak aslı değerini verecek olan kombinasyonlar (çiftin en azından biri bir metal dışı, ya da çok alçak etkileşimli iki metal) veya  $W_{ah}$  (iki metal) nin yüksek değeri haiz olduğu kombinasyonlar kullanılıp  $W_{ab}$  iyi bir sınır yağlayıcısıyla düşürülecek

**Tablo 35.-  $k$  aşınma katsayısının tipik değerleri**

Koşul	Metal (metal üstünde)	Metaldışı (metal üstünde)
Temiz	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Fena yağlanmış	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Ortalama yağlama	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Mükemmel yağlama	$2 \cdot 10^{-6} - 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$

Sert malzemelerin kullanılmaları hususunda, bunun genellikle çok kesin etki yapmadığı kaydedilecektir. Nitekim, yarı - sert halinde 40 Re ( $-400 \text{ kg/mm}^2$ ) ve tam sert halinde de 60 Re ( $\sim 800 \text{ kg/mm}^2$ ) sertliğinde bir alaşımlı çelik farz edelim.

Sertlikte bu iki faktörlük fark, yapışkan aşınma derecesinde iki faktörlük bir fark meydana getirecektir ki bu, ancak ölçülebilecek kadar büyüktür, şöyle ki aynı koşullar altında tekrarlanan aşınma deneylerinde fark muhtemelen üç faktörlük olacaktır!

Ama sertlikten yana farkın beraberinde belirgin kimyasal doku farkını da getirmesinin muhtemel olduğu göz ardı edilmeyecektir; örneğin başat olarak bir demir dokusundan başat olarak bir demir karbürü bileşimine değişme olacaktır. *Demir karbürü bir metal olmayıp bir metaloid malzeme olduğundan, demirden daha aşağı bir yüzey enerjisine sahip olmalı ve dolayısıyla da başka malzemelerle daha aşağı bir etkileşim arz etmelidir.* Bunun anlamı, yağlanmamış halde demirin haiz olduğu  $k$  değerinden çok aşağı bir  $k$  değerine sahip olacaktır; Ama iyi bir sınır yağlayıcısıyla kaplı olduğunda demirinkine göre daha yüksek  $k$  değerini haiz olup bu kimyasal değişmeler muhtemelen aşınma derecesinde 10 faktörlük farklar hasıl edip bunları sertlik değişmelerinin meydana getirdikleri 2 faktörlük değişmelerden daha önemli kılar.

Hal böyle olunca birçok uygulamada çelik kayan yüzeylerin azamisinde sertleştirilmesine neden özen gösterildiği şaşırtıcı olabilir. Bunun nedeni, kayan sistemlerin içine ithal edilebilecek başlıca katı madde silis (kum) olup bunun sertliği  $800 \text{ kg/mm}^2$  civarındadır. Böyle

olunca da 400 düzeyinden 900 kg/mm<sup>2</sup> düzeyine bir sertlik değişmesi, silisten ileri gelebilecek olan abrasif aşınmayı yok edecektir.

Önceleri, bir kayma sisteminin bir yumuşak ve bir sert yüzeyden oluşmasının gereği belitsel olarak kabul edilirdi ki bu, yağlanan yataklar için mükemmel bir uygulama olup bunda sert çelik şaft ve bir yumuşak yatak malzemesi çok yararlı olarak kullanılır. Ancak bu sistem, iyi bir yağlamanın varlığında iyi çalışır; aksi halde yumuşak malzemenin aşınması çok aşın olur.

Yumuşak yatak malzemesinin kullanımı sadece, yumuşak metalde yakalanabilen abrasif aşınma parçacıklarının yağlayıcı tarafından taşınabilmesi veya yumuşak metalin şekil değiştirmesinin yatak yüzeylerini, hidrodinamik yatak etkisi sağlanacak şekilde hizaya getirmeye yardımcı olması halinde yararlı olur.

Bu etkenlerin önemli olmadığı durumlarda iki sert yüzey kullanmak tercih edilebilir.

### **Malzemelerin**

Elmas

Bor karbürü

(Silisyum karbürü, alüminyum oksidi)

Tungsten ve/veya titanium karbürü

Nitrürlenmiş çelik

Karbürlenmiş (semente) çelik

sırasına göre tasnifi, azalan aşınma mukavemeti ama artan malzeme ve bunun işlenme maliyeti bakımından artan ilgi kademesini gösterir. Her ne kadar bu malzemelerin herhangi biri muhtemelen kendisiyle kaymada emniyetle kullanılabilirse de farklı kombinasyonlara, örneğin bir semente çelik üzerinde bir nitrürlenmiş çeliklere başvurulması olağan bir uygulamadır.

Göreceli olarak büyük miktarlarda aşınmaya müsaade edilebilen ılımlı maliyetli uygulamalarda kayan yüzeylerin biri çoğu kez alçak veya orta karbonlu çelikten olur. Öbür yüzey de genellikle çeliğe uyabilen, ezcümle bir pirinç veya bronz alaşımı, ya da dökme demir veya bir alüminyum bronzundan olur. Plastik yataklar da (örneğin Teflon) sık kullanılır.

Sinterlenmiş (sıcakta sıkıştırılmış) metal tozundan kütükler yatak olarak sık kullanılır; gözeneklerin yağlayıcı için bir depo görevini yerine getirmelerinin ötesinde, her bir birleşme, küçük olması itibariyle, yapışkan aşınmayı önlemeye meyleder.

### **A.III.5.2 MALZEMELERİN AŞINMA TEMEL KANUNLARI**

Makine parçalarının aşınma hesabı, belli bir birleşmede kullanılan malzemelerde ve belli çalışma koşullarında etkin aşınmanın fiziksel kanunlarına dayanacaktır. Hesapta ilk aşama, birleşme içinde, müsaade edilemeyecek aşınma tipleri (örneğin "sarma") nden kaçınılacak şekilde aşınma tipini saptayan sınırlayıcı koşulları ortaya koymaktadır, ikinci olarak, kayan çiftlerde aşınma derecesi için analitik münasebetler kullanılacak olup bu sonuncular, gelişigüzel



değişkenlerin bir fonksiyonu olarak telakki edileceklerdir; zira aşınma derecesine egemen olan parametreler dağılma eğilimi arz ederler.

Birleşmelerin aşınma hesabı en önce, sürtüşen yüzey üzerinde basıncın dağılımı ve lineer aşınmayı tahmin etmeye yöneliktir; bu, aynı zamanda, aşınmalarından dolayı karşılıklı parçaların göreceli pozisyonlarında meydana gelen değişmeyi de değerlendirip malzemelerin aşınmasını, parçalarınınkine, makine birimlerinin işlevsel niteliklerine ve birleşmelerin tasarım ve boyutlarına bağlamalıdır.

Hesap keza aşınmanın zaman içinde gelişmesinin bilgisini de gerektirir. Birçok durumda, aşınma sürecinin t süresiyle U aşınma miktarı arasındaki münasebet, lineer olarak kabul edilebilir; böylece de birim zamanda aşınma derecesi sabit olur:

$$\gamma = \frac{U}{t} = \text{sabit}$$

Çeşitli aşınma tiplerinin (elastik temas plastik temas veya mikrokesme ) yorulma teorisine göre lineer aşınma derecesi, temas alanında ki basınçla orantılıdır.

$$I = kp^m \text{ olup}$$

$1 < m < 3$  ; alıştırılmış yüzeylerde  $m-1$  dir.

Abrasif aşınma koşullarında, lineer aşınma derecesi ile basınç arasında yine bir lineer münasebet mevcut olup bu,  $I = kp$  şeklinde ifade edilir; yani U lineer aşınma, eş sürtüşme yolu üzerinde nispi kayma hızına tâbi değildir:  $U = kpL$ .

Bu denklemin iki tarafını birleşmenin çalışma süresine böldüğümüzde

$$y = kp^m \quad (1) \text{ elde edilir;}$$

burada  $k$  = malzemenin aşınma mukavemetini ve birleşmenin koşullarını (yağlama, sürtünen yüzeylerin kirden korunması, vb) niteleyen katsayıdır.

Zaman aşınma derecesi (Y) ve lineer aşınma derecesi (I),  $y = vl$  denklemiyle birbirlerine bağlıdır.

Bu kanunlar birçok makine parçasının (kızaklar, sürtünmeli kavrama levhaları, sevk cıvata ve somunları, krank mekanizmalarında geçmeli bağlantılar, vb.) aşınma hesabında kullanılabilirler. Genel durumda zaman aşınma derecesi bir üssi fonksiyon olarak ifade edilebilir:

$$\gamma = k p^m v^n \quad (2)$$

Mutat olarak, abrasif aşınmada  $n = 1$  dir.

$k$  katsayısının değeri, daha önce görmüş olduğumuz gibi, başlıca kayan çiftin malzemeleri, temas halindeki yüzeylerin geometrisi ve yağlama tarafından etkilenir.

### A.III.5.2.1 Yüzey ve birleşmenin aşınması

**Bir yüzeyin aşınması'** nın değerlendirilmesi için başlıca karakteristik, ( $U$ ) *lineer aşınma* olup bu, parçanın boyutunda sürtüşen yüzeylere dikey yönde değişme olarak tanımlanır. Genellikle aşınma yüzey üzerinde uniform olarak dağılmaz; bu nedenle  $U = f(x, y)$  dir ki  $x$  ile  $y$ , sürtüşen yüzeylerin koordinatlarıdır.

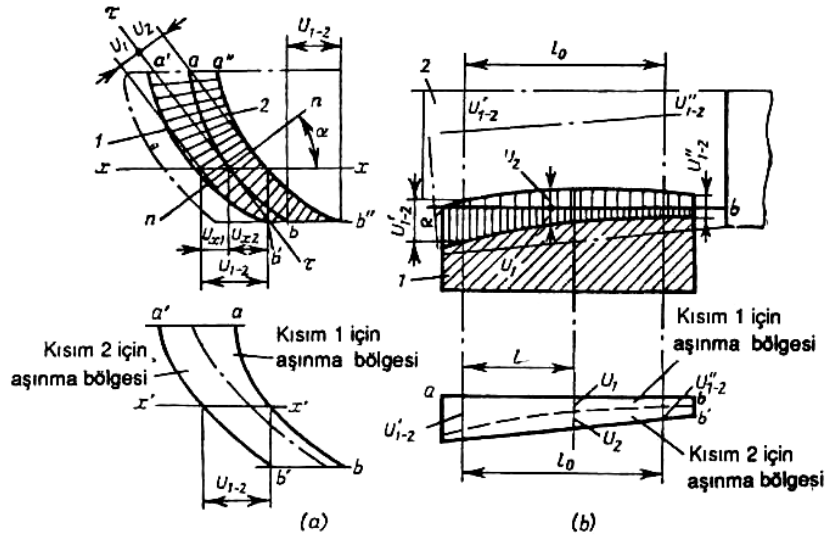
**Bir birleşmenin aşınması**, aşınmaları sırasında karşılıklı parçaların birbirlerine yaklaşımının bir karakteristiği olmaktadır. Bu tipten aşınma, karşılıklı parçaların, aşınmalarıyla nispi pozisyonlarında değişmeyi hasil eden bir veya birçok geometrik parametre ile ölçülür.

Birleşmelerin (yataklar, mafsallar ...) aşınması, bir makine ya da mekanizmada başlangıç işlevsel karakteristiklerinin kaybindan doğruca sorumlu olmaktadır. Belli bir kayan çiftin tasarım ve kinematik görünüşleri büyük önemi haizdir zira bunlar, aşınmadan ileri gelmiş olabilecek yer değiştirmenin (yaklaşımın) tabiat ve yönünü kontrol ederler.

Şek. 111, tipik kayan çiftlerde aşınmayı saptamak için diyagramları verir. Aşınmaya dayanıklı yataklarda çalışan dönel parçalar (komponentler) için muhtemel karşılıklı yaklaşımın  $x - x$  yönü peşinen bilinir (Şek. 11 la).

Bu durumda, birleşmenin aşınması tek bir  $U_{1-2}$  parametresiyle belirginleşip bu, aşınmış 1 ve 2 parçalarının  $x - x$  yönünde göreceli yaklaşım miktarını ifade eder.

Parçaların yaklaşımının sadece  $x-x$  yönünde mümkün olması nedeniyle, parçaların, mümkün yaklaşma yönünde ölçülmüş aşınma miktarlarının toplamı, sabit ve tüm birleşmenin aşınma miktarına eşit, yani  $U_{x1} + U_{x2} = U_{1-2} = \text{sabit}$ .



Şek. 111.- Birleşme ve karşılıklı yüzeylerin aşınması, (a) karşılıklı parçaların birbirlerine yaklaşımının yönü peşinen saptanmıştır; (b) karşılıklı parçalar, aşındıkça kendiliklerinden hizaya gelirler.

Bu münasebet, *cisimlerin temas koşulu* diye adlandırılabilir şöyle ki birleşmenin aşınma sürecinin bir önemli görünümünü, ezcümle parçaların aşınmış yüzeylerin, şekilleriyle ilişkisi olmadan tam temas halinde olmalarını niteler, a' b' ve a'' b'' temas yüzeyi her iki parçada müşterek olduğundan, genellikle karşılıklı nüfuziyet bölgesi olarak anılan bir bölge tasarlanabilir; bu bölge sürtüşen parçaların her birinde aşınmış malzeme hacmini belirtir. Karşılıklı nüfuziyet bölgesi bir aşınma diyagramı olup bu, ab ilk, aşınmamış yüzey eğrisiyle belirtilmiş ve a'b' ile a''b'' birbiri üzerine bindirilmiştir (şek. 111a' nin alt kısmına bkz.).

Temas koşullarından, aşağıdaki denklemler, yüzeyin her noktası için geçerlidir:

$$U_{1-2} = \frac{U_1 + U_2}{\cos \alpha} \quad \text{veya} \quad \gamma_{1-2} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\cos \alpha} \quad (3)$$

Burada  $U_1$  ile  $U_2$  belli bir noktada parçaların aşınması olup sürtüşen yüzeye n-n dikey yönde ölçülmüştür;  $a$ , sürtüşen yüzeylere dikey çizgi ile mümkün yaklaşım yönü arasındaki açı;  $Y_{1-2}$  = birleşmede zaman aşınma derecesi ve  $Y_1$  ve  $Y_2$  de, belli bir noktada zaman aşınma dereceleridir.

Karşılıklı yaklaşım yönünün önceden saptanmadığı ve sürtüşen parçaların göreceli pozisyonunun etki yapan kuvvetlerin tabiatı ve aşınmış yüzeyin şekli tarafından kontrol edildiği birleşmelerde, değişik münasebetler geçerli olacaktır.

Bu tür bir birleşmenin bir tipik örneği bir şaft ile bir kaygan yataktır (şek. 111b). Parçalar aşındıkça şaft yatak içinde aşağı düşer ve meyillenir, pozisyonunu değiştirir. Şaftın birleşmenin aşınmasını saptayan yeni bir pozisyonu iki yolla tanımlanabilir: ya şaft ekseninde bir noktanın ve şaft eksenine eğimi açısının yer değiştirmesi, ya da iki lineer parametre,

$$U'_{1-2} \text{ ve } U''_{1-2}.$$

Yukarıdaki değerlerin ölçüldüğü şaft eksenindeki noktalar, istenildiği gibi seçilebilir.

$U'_{1-2}$  ve  $U''_{1-2}$  nin değerleri, dönme ekseninin başlangıç pozisyonuna dikey bir yönde, aşınmadan ileri gelen ufak eğim açısı dikkate alınmadan, ölçülür.

Birleşmenin  $U'_{1-2}$  ve  $U''_{1-2}$  aşınmasını belirleyen parametreler arasındaki münasebeti ve / koordinatında herhangi bir noktada karşılıklı parçaların ( $U_1$  ve  $U_2$ ) aşınmasını bulmak için, bu durumda (şek. 111b nin alt kısmına bkz) karşılıklı nüfuziyet bölgesini ele alalım. Burada

$$U_1 + U_2 = U'_{1-2} \left(1 - \frac{l}{l_0}\right) + U''_{1-2} \frac{l}{l_0} \quad (4)$$

olup  $l_0$ , birleşme aşınmasını tanımlayan  $U'_{1-2}$  ve  $U''_{1-2}$  parametrelerinin ölçüldüğü noktalar arasındaki mesafedir.

Çok daha çapraşık bir durum, her iki  $U'_{1-2}$  ve  $U''_{1-2}$  parametrenin, sürtüşen parçaların göreceli pozisyonunun bir fonksiyonu olması halidir.

### A.III.5.2.2 Aşınma koşullarına göre birleşmelerin sınıflandırılması

Makine parçalarının aşınmasıyla ilgili sorunların çözümü, bir birleşmenin tasarımının sürtüşen yüzeyde aşınma dağılımı ve de aşınmış yüzeyler arasında etkileşimin tabiatı üzerinde belirgin bir etkisinin bulunduğu açık idrakini gerektirir. Birçok durumda tasarım faktörlerinin bir aşınmış yüzeyin biçimi üzerinde etkisi, malzemelerde aşınmanın tabiatının etkisinden daha büyük olur.

Örneğin, düz gaydlarda aşınmış yüzey biçimi, etki yapan kuvvetlere, göreceli hareketin türü ve gaydların şekil ve ölçülerine, bu gaydların yapılmış oldukları malzemeninkinden çok bağlıdır.

Bir makine geliştirilirken tasarım mühendisi, makinenin içereceği çeşitli birleşmeler için uygun aşınma hesap yöntemlerine muhtaçtır. Aşınma koşulları itibariyle tipik birleşmelerin bir sınıflandırılması, Tablo 36' da gösterilmiştir. Parçaların muhtemel yaklaşımının yüzeylerin aşınmasından sonuçlanan türüne göre bütün birleşmeler iki tipe ayrılır. I. tip birleşmeler, sadece belirtilmiş  $x - x$  yönünde belirtilmiş aşınmış parçaların yaklaşımını sağlayan ilâve aşınmaz ya da az aşınır gaydları haizdirler. II. tip birleşmelerde parçalar kendiliklerinden hizaya gelirler ve bunların göreceli pozisyonları, aşınmış yüzeyin biçimine bağlı olur.

Bu tür birleşmelerde kayan çiftin işlevsel özellikleri üzerinde aşınmanın etkisi daha derin olur.

**Tablo 36. - Aşınma koşullarına göre birleşmelerin sınıflandırılması**

TİP	A			B	
	1. GRUP	2. GRUP	3. GRUP	4. GRUP	5. GRUP
I					
II					

**Not. A - Değişmez temas koşulları; B - Değişken temas koşulları**

Bu sınıflandırma altında bütün birleşmeler ayrıca beş gruba ayrılırlar; bu gruplar, sürtünme ve aşınma koşullarının karşılıklı yüzeylerin tek ve aynı yolda hareket eden noktaların 1. grup birleşmelerde, aynı yol boyunca hareket eden noktalarında aynı olup olmadıklarına göre saptanırlar. 1. grup birleşmelerde, aynı yol boyunca hareket eden noktalar her iki parçada aynı şekilde aşınırlar (örneğin, merkezî olarak yüklenmiş dönel yüzeyler). 2. gruba bağlı olanlarda, karşılıklı parçaların sadece birinde aynı yol boyunca hareket eden noktaların aşınma koşulları eş olur (örneğin, kaygan yataklar ve takoz frenler). Aşağı ölçüde bir kinematik çift oluşturan

birleşmeler (kızaklar, krank mekanizmaları) 3. grupta; daha yüksek bir kinematik çift oluşturan birleşmeler (antifriksiyon yataklar, kam mekanizmaları) 4. grupta toplanıyor. 3. ve 4. grup birleşmelerde karşılıklı her iki parçanın bütün noktalarında aşınma koşulları eş olmayıp bu tür birleşmelerde uniform olmayan aşınma çok muhtemeldir.

5. gruptaki parçalar, bir katı madde ya da çevre ile temasta olanlardır: zemin - toprak, kaya veya talaşlı işlenen bir parça. Burada, bir abrasif veya herhangi başka bir çevrenin etki yaptığı sadece bir yüzeyin aşınması üzerinde durulmaktadır; çalışan yüzeyin biçimi çevreyle etkileşimin tabiatına (yükler ve hızlar diyagramı) bağlıdır. Bütün birleşmeler ayrıca iki kategoriye de teftik edilebilir: *A* - değişmez temas koşullarını haiz olanlarla *B* - değişken temas koşullarını haiz olanlar (aşağıda hesap yöntemlerine bkz.).

Makine ve teçhizatla karşılaşılacak yukarıda zikredilmiş bütün tiplerdeki birleşmeler Tablo 37' de gösterilmiştir.

**Tablo 37.- Aşınma koşullarına göre birleşmelerin sınıflandırılmasını gösteren örnekler**

Grup	Birleşme tipi	
	I (x - x yönü belirtilmiş)	II. (Kendiliğinden hizaya gelen)
1	Konik ve friksiyon kavramaları	Friksiyon kavrama plakaları
2	Kaydırma civata ve somunu	Şaft ve düz yatak; kendini hizalayan pabuçlu takozlu frenler; dairesel kızaklar (eksantrik yüklemeli)
3	Piston segmanları ve silindir gömleği	Düz kızaklar; kayan ve geçmeli bağlantı
4	Dişli çarklar; kam ve kam sürtücüsü	Teker ve ray; bilyalı yatak ve kızaklar
5	Sıkıca tespit edilmiş kesme takımı	Saban demirleri; kendini hizalayan kesme takımları

Bir birleşmenin ait olduğu tip ve grup, onun aşınma hesabının yöntemini saptayıp birleşmenin tasarımının beklenen aşınma karakteristiklerine bağlanmasını mümkün kılar.