

A.III.9 METALLARIN AŞINMA MUKAVEMETİNİ ARTIRMA YOLU OLARAK TERMO - KİMYASAL İŞLEM

Metallerin antifrikasyon niteliklerini ve aşınma mukavemetlerini artırma, termo kimyasal işleme sağlanmakta olup bunda, kimyasal reaksiyonlar kullanılarak kimyasal olarak aktif bileşimlerle metal yüzeylerinin difüzyon doymuşluğu veya değişimi hasıl edilir.

Termo - kimyasal işlem (TKİ) katı, sıvı ya da gazlı ortamlarda icra edilir. Sürecin süresi kullanılan ortamın bileşimi ve sıcaklığa göre değişir. Süreç özellikleri ve sonuçlar itibariyle metallerin TKİ' i başlıca iki grupta toplanır.

(1)Sürtüşen parçaların daha yüksek yüzey sertlikleri yoluyla aşınma mukavemetini artırmada kullanılan TKİ. Bu tür işlemler, geniş ölçüde kullanılan karbürleme,nitrürleme, siyanürleme, borlama vs. yi içerir.

Bunlar esas itibariyle abrasif aşınma mukavemetini artırmada kullanılırlar.

(2)Kimyasal olarak aktif maddelerle zenginleştirilmiş ince yüzey tabakaları teşkil ederek başlıca pullanmaya dayanma niteliklerini artırmaya yönelik TKİ; bu tabakalar, sürtünmede sarma ve tufal dökmeyi önlemektedirler. Bu tür TKİ, sülfürleme, sülfosiyanürleme, yüzeyin selenyum, tellür, kadmium iodür banyosunda doyurulması gibi işlemlerdir. Bu süreçler yüzey sertliğini artırmazlar (ya da bunu çok az yaparlar); bunların etkisi, sürtünme katsayısını azaltıp çizilmeleri yerelleştirmekten ibarettir.

TKİ Süreçleri ve bunların uygulanması

Karbürleme (semantasyon), nitrürleme, siyanürleme... gibi mutad yüzey sertleştirme yöntem ve bunların uygulanmalarının ayrıntılarını görmeyeceğiz.

Sadece nispeten yeni sayılacak yöntemler üzerinde özetle durmakla yetineceğiz.

Borlama : Bu yöntemde çelikte HV 1400 - 1500 yüzey sertliği ve HV 2000 mikrosertlik, ve dolayısıyla yüksek bir aşınma mukavemeti sağlanır.

Borlama, orta karbonlu çeliklerle bazı alaşımlı çeliklere uygulanır. İşbu yüksek aşınma mukavemeti, 900 °C a kadar sürer; bunun dışında karbonlu yüksek kromlu ve austenitik çeliğin korozyona mukavemeti iyileşir. Borlama koşulları ve etkileri, Tablo 44' de verilmiştir.

Tablo 44.- Çeliklerin horlanması

Hal	Ortam	Süreç koşulları		Sonuçlar	
	Bileşim	Sıcaklık°C	Süreç süresi sa.	Yüzey sertliği	Tabaka derinliği mm
Katı	% 80 bor karbürü, % 0,5 - 1 amonyum klorürü, gerisi kuartz kumu	950	6	-	0,12-0,14
	% 50 bor karbürü, % 50, bağlayıcı olarak kriolit (sodyum-alüminyum flüorür)	1200	2-3 (*)	H 1000	0,12
Sıvı	Elektroliz banyosu, %100 boraks	930-950	2-6	HV 1400-1550	0,15-0,35
	% 60-70 boraks, % 30-40 bor karbürü	900-1100	5-20	-	0,15-0,85
Gazlı	Dibor I ve hidrojen 1 : (25 ilâ 75)	800-850 900-1100	4 2-6	> H 1800	0,20 0,07-0,16
	Bor triklorürü ve hidrojen 1: 20	850	3-6		0,11-0,20

(*) Süre, dak

Sülfürleme ve sülfö - siyanürleme.

Tuz banyolarında sülfürleme, basit donanım gerektirmesi ve göreceli hızlı bir süreç olması itibarıyla büyük ölçüde kullanılır olmuştur.

Sülfürleme, önemli çizilme önleyici etki meydana getirip daha yüksek sarma yüklerine imkân verir. Aşınma mukavemeti 2 ilâ 5 kat artar.

Sülfürlemenin kalitesini ölçmek için en mutad yöntem, bir dört merdaneli sürtünme deney makinesi olup bunda sarma yükü, sürtünme katsayısı ve aşınma derecesinin ölçümleri yapılır.

En geniş ölçüde kullanılan sülfürleme ve sülfö-siyanidleme banyoları için karışım formülleri, Tablo 45' de verilmiştir.

Tablo 45.- Sülfürleme ve sülfosiyanidleme

Banyo formülü	Çalışma sıcaklığı °C	St 45 için sarma yükü, kgf
1.8% NaCNS (KCNS), 5.5% Na ₂ S ₂ O ₃ , 41.7% KCl, 51.0% Na ₂ SO ₄	560	> 500
69% KCNS, 22% Na ₂ S ₂ O ₃ , 9% NH ₄ CNS	200	100-140
73% K ₄ Fe (CN) ₆ , 10% Na ₂ S ₂ O ₃ , 17% NaOH	560	100-120
44% K ₂ CO ₃ , 54% CO (NH ₂) ₂ , 2% Na ₂ S	580	400-500
34% NaCN, 7% Na ₂ S ₂ O ₃ , 16% NaCO ₃ , 16% K ₂ CO ₃ , 27% NaCl + KCl	560	250-300
25% NaCN, 1.2% NaCNO, 2% Na ₂ CNS, 2.2% Na ₂ S, 34.8% Na ₂ CO ₃ , 34.8% NaCl-KCl	560	250-300
95% NaCN, 5% Na ₂ S ₂ O ₃	560	150-200
4% NaCN, 5% NaCNO, 2% NaCNS, 47% Na ₂ CO ₃ , 40% NaCl+KCl	560	150-200
30% NaCN, 7% NaCNO, 60% NaOH, 3% S	560	180-200
30% NaCN, 16% NaCNO, 4% Na ₂ S, 25% Na ₂ CO ₃ , 25% Na Cl + KCl	560	200-250

Banyo formülü	Çalışma sıcaklığı °C	St 45 için sarma yükü, kgf
35% NaCN, 11% NaCNO, 10% CaS, 15% NaCl + KCl, 15% Ba Cl ₂ , 25% Ca Cl ₂	560	200-250
30% NaCN, 7% NaCNO, 60% NaOH, 3% S	560	150-200
4% NaCN, 15.5% NaCNO, 35% Na ₂ CO ₃ , 45% NaCl + KCl, 0.5 S	560	180-200
16% NaCN, 21% NaCN, 21% NaCNO, 40% Na ₂ CO ₃ , 22.7% NaCl + KCl, 0.3% S	560	180-200

Not 1. İşlem görmemiş St 45 için sarma yükü 15 ilâ 20 kgf'dur.

Not 2. Birinci formül için işlem süresi 1sa, bütün diğer banyolar için 3 sa'dır.

En iyi sonuçlar karbonlu çeliklerle alçak alaşımlı çeliklerde elde edilir; yine önemlice iyileşme elde edilmekle birlikte ikinci derecede sonuç, kromlu ve paslanmaz çeliklerin ve titanium alaşımlarının sülfürlenmesiyle hasıl olur.

Sülfosiyanidleme, yüzey tabakasının hem nitrürler, hem de sülfürlerle doyurulması sürecidir. Bunda pullanmaya direnç iyileşmekte (mamafih sülfürlemedekinden biraz daha az), aşınma mukavemeti artmaktadır (bazı metallerde sülfürlemede elde edilenden daha fazla).

Titanium alaşımları için TKİ yöntemleri: Makine mühendisliğinde kullanılan bütün metaller arasında titanium alaşımları, en zayıf antifriksiyon nitelikleri ve en yüksek pullanma eğilimi arz eden metallerdir. Çelikte kullanılan TKİ yöntemleri titanium alaşımlarında etkisiz kalmaktadır; mamafih özel TKİ teknikleri veya özel ilaveli yağlayıcılar olmadan esasen hareketli birleşmelerde titanium alaşımlarının kullanılmasına müsaade edilemez.

Titanium alaşımları için TKİ yöntemleri ve elde edilen pullanmaya dayanma nitelikleri Tablo 46' da gösterilmiştir.

Maksimum etki NIKHIMMASH (S.S.C.B. standardı) kadmium iodür banyosunda elde edilip bu, titanium alaşımlarını yağlamak ya da yağlamasız olarak kayan çiftlerde kullanma olanağını sağlar.

Tablo:46 Titanium alaşımlarının termo – kimyasal işlemi

Proses	Ayıncı özellikler	İşlem sonuçları		Çalışma koşulları		
		Tabaka derinliği (kaplama kalınlığı) μm	Mikro-sertlik kgf/mm^2	Yağlama gereksinimleri	basıncı kgf/mm^2	Kayma hızı m/sn
NIKHIMMASH 2/6 No 1 banyosunda sülfürleme	Titaniumla ergimiş tuzlar arasında kimyasal etkileşim, titanium sülfürleri ve oksitlerinin oluşumu	10-20	-	Yağlamasız çalışmaya müsaade edilir.	100-150	10
NIKHIMMASH kadmium iodür banyosunda işlem	Titaniumla ergimiş tuzlar arasında kimyasal etkileşim	20-30	-		400-500	10
Isıl oksitleme	700 ilâ 800 °C' ta titanium veya alaşımlarıyla oksijen arasında kimyasal etkileşim	30-60	700-800	Yağlama veya antifriksiyon vernik kaplaması gerekli	75-100	1
Nitrürleme	850 ilâ 950 °C' ta titanium veya alaşımlarıyla azot arasında kimyasal etkileşim	150-250	600-1200	Yağlayıcısız veya bununla çalışma mümkün	100	10
Krom kaplama	Titanium alaşımları üzerine elektro-kaplama ile krom bırakılması	50-150	900-1100		100	2

Proses	Ayrıncı özellikler	İşlem sonuçları		Çalışma koşulları		
		Tabaka derinliği (kaplama kalınlığı) μm	Mikro-sertlik kgf/mm^2	Yağlama gereksinimleri	basınç kgf/mm^2	Kayma hızı m/sn
Kimyasal nikel kaplama	Özel alkalin veya asit eriyikler içinde titanyum alaşımları üzerine nikel bırakılması	15-30	700-800	Mineral yağlarla yağlama gerekli	75	2
Molibden veya tungsten kaplama	200 °C üzerinde ısıtılmış yüzey üzerine vakumda molibden veya tungsten karbürü (CO radikali) buharlarının ısıyla ayrışması	20-200	yumuşak kaplama 200-400, sert kaplama 1500-3000	Mineral yağlar veya greslerle yağlama gerekli	50	0,5
Molibden disülfür veya tungsten disülfür ile çift tabaka kaplama	Molibden veya tungstenle termodifüzyon ve bundan sonra, molibden disülfür veya tungsten disülfür teşkil etmek üzere sülfürleme	-	-	Yağlayıcısız çalışmaya müsaade edilir.	300	2

A.III.9.1 Abrasif aşınma durumunda kullanılacak malzemeler

Burada iki malzeme türü irdelenecektir: abrasif aşınma istendiğinde abrasif olarak kullanılacaklarla abrasif bulaştırıcıların mevcut olup abrasif aşınmanın önlenmesi istenildiğinde kayan malzemeler olarak kullanılacaklar.

Abrasif olarak kullanılmaya uygun malzemelerde aranılan nitelikler, iyi kesme fiili için sertlik ve keskinliktir. Sertlik kriteri, abrasifin aşındırılacak malzemedan daha sert olması anlamındadır; ancak fiilî kesme etkisi bakımından sertlik farkının aşırı olmasına gerek olmadığı kaydedilecektir. Örneğin, abrasifin aşındırılacak malzemedan ancak % 50 daha sert olması halinde, bundan çok daha sert abrasifin hasil edeceği kadar büyük aşınma derecesi meydana getirir. Bununla birlikte, abrasifin, aşındırılacak malzemedan az daha sert olması halinde de bu kez bunun keskin köşeleri plastik deformasyon ve abrazyonla yuvarlaklaşır ki abrasifin etkisi azalır. Bu itibarla, çok yüksek aşınma derecesi hasil etmek için değil de, bu dereceyi uzun süre devam ettirmek için çok sert bir abrasif kullanmakta yarar vardır.

Bir abrasiften beklenen ikinci nitelik de keskin olmasıdır. Bu itibarla abrasifin gevrek olması yararlıdır şöyle ki yüksek gerilme altına girdiğinde ya da aşındığında yine de keskin uç ve köşeler bırakır. Bu kriter, bir metalden çok bir metal dışı malzemeyi yeğler.

Bu kriterlerin her ikisi de sert bir metal dışı malzemenin abrasif olarak daha uygun olduğunu ifade ederler şöyle ki bunlar bilinen en sert malzemeler olup gevrek kırılma ile dağılma eğilimindedirler. Gerçekten, kullanılmakta olan bütün abrasifler bu kategoridendirler. Her ikisi de 2000 kg/mm^2 nin üstünde sertlikte olan alüminyum oksidi ve silisyum karbürü genel kullanım için tercih edilen malzemelerdir zira aşın sertlik, gevreklik ve ucuzluk niteliklerini kendilerinde birleştirirler. Daha da yüksek sertlikte malzeme bor karbürü (2750 kg/mm^2) ve elmas (8000 kg/mm^2) dir, ama bunların ilki nispeten, öbürü, yanma varılamayacak kadar pahalıdır.

Tablo 47.- Abrasif olarak kullanılan malzemeler

Malzeme	Bileşim	Sertlik (kg/mm ²)
Elmas	C	8000
Bor karbürü.	B ₄ C	2750
Karborundum, silisyum karbürü	Si C	2500
Titanium karbürü	Ti C	2450
Korundum, alümin	Al ₂ O ₃	2100
Zirkonium karbürü	Z ₂ C	2100
Tungsten karbürü	WC	1900
Garnet	Al ₂ O ₃ . Fe O. 3 Si O ₂	1350
Zirkonia	Z ₂ O ₂	1150
Kuvartz, silis, kum	Si O ₂	800
Cam	Silikat	500

İş abrasif etkiyi önlemeye gelince, sertlik mülâhazası ön plana çıkar. Abrasif aşınmaya dayanması gereken yüzey, bulaştırıcı parçacıklardan daha sert olacaktır. Doğal olarak en mutat bulaştırın, yeryüzünde en bol olan silisyum oksididir. Bunun sertliği, az çok metallerde varılabilmiş olanlarınkı kadar yüksek olup bunun sonucu olarak, silisyum oksidine dayanabilecekler arasında sınırlı sayıda malzeme bulunur. Bunlar, Tablo 48' de gösterilmiştir.

Tablo 48.- Abrazyona dayanıklı malzemeler

Kayar sistemlerin tasarımında, abrasif tanecikleri yok edebilmek faydalıdır. Bu,

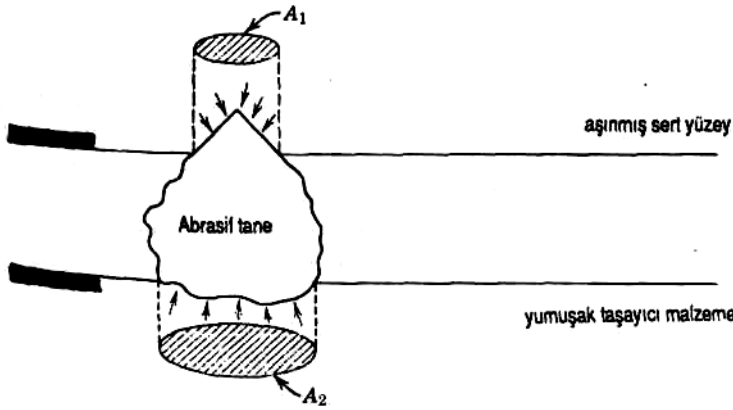
Malzeme	Sertlik
Yatak çeliği	700 - 950 kg/mm ²
Takım çeliği	700 - 1000
Krom (elektro-kaplama)	900
Semante çelik	900
Nitrülenmiş çelik	900 - 1250
Tungsten karbürü (kobalt bağlantılı)	1400 - 1800
Sert metaldışı, ya da bundan oluşmuş kaplama	Tablo 47' ye bkz.

devreden bir yağlayıcıyı filtre ederek en iyi şekilde yerine getirilir ama daha iyisi, bir sert ve bir yumuşak kayan malzeme kullanmak olup bu sonuncusunun işlevi, sistemin içine giren herhangi abrasif parçacığı toplayıp gömmektir. Mutat olarak sertleştirilmiş çelik yüzeylerle birlikte kullanılan tipik yumuşak malzemeler, Tablo 49' da verilmiştir.

Kayan sistemlerin dışından ithal edilen abrasif parçacıkların yanısıra, kayma sırasında hasıl olan aşınma parçacıklarının zarar verme olanağı da dikkate alınacaktır. Bunların en yumuşağı, yaklaşık olarak içinden çıktıkları kayan yüzeyin sertliğine eşit olur; bu itibarla yumuşak malzeme, sert malzeme sertliğinin üçte birinden az sertlikte olacaktır (şek. 127). Tablo 49 pratikte bu kaideye gerçekten uyulduğunu gösterir.

Tablo 49.- Muylu yataklarında kullanılmak üzere önerilen yumuşak malzemeler

Yatak malzemesi	Sertlik kg/mm ²	Minimum şaft sertliği	Sertlik oranı
Kurşun esaslı babbıt	15 - 20	150	8
Kolay esaslı babbıt	20 - 30	150	6
Alkali sertleştirmeli kurşun	22 - 26	200 - 250	9
Bakır - kurşun	20 - 23	300	14
Gümüş (üstten kaplama)	25 - 30	300	8
Kadmium esaslı malz.	30 - 40	200 - 250	6
Alüminyum alaşımı	45 - 50	300	6
Kurşun bronz	40 - 80	300	5
Kalay bronz	60 - 80	300 - 400	5



Şek. 127.- Bir yumuşak yatak malzemesine gömülmüş bir abrasif taneciğin varsayımsal görünümü. Geometri, A_2 , A_1 den büyük olacak şekildedir (örneğin üç kat büyük) ve böylece de yatak malzemesinin sert yüzeyin sertliğinin üçte birinden az sertlikte olması halinde, tanecik yatak malzemesinin içine itilecektir.

Bu içli yaratılan abrasif parçacıkların muhtemel zararı ele alındığında abrasif aşınmada boyut etkisi kaydedilecektir. (Yukarıdaki bahse bkz.)

Abrasif tanecikler küçük oldukları sürece yapacakları zarar miktarı sınırlı olur ve bu, sadece sınır yağlaması ve katı - katı teması vaki olduğu zaman değil, özellikle önemli kalınlıkta bir filmin çoğu zaman kayan yüzeyleri ayırdığı akışkan yağlama durumlarında da hasıl olur. Dolayısıyla başlıca sakınılacak tehlike, gerçekten iri aşınma parçacıklarının oluşmasıdır.

İri aşınma parçacıkları genellikle, ya çok sayıda gerilme sayıklarına uğramış ya da daha başından itibaren gevrek olan malzemelerin yüzey yorulma kırılmasından meydana gelir. Bu faktörler, nispeten gevrek kırılmaya bağımsız iyi yorulma niteliklerini haiz bir metalin önemini belirtirler. Bir anlamda bu gerekler, bu bahiste daha önce vurgulanmış yüksek sertlik gereklerini tadil eder. Yatak çelikleri gibi malzemelerde, malzemenin en yüksek sertlikte olanları (örneğin 65 Rc sertliğinde 52100 çeliği), 60 Rc düzeyinde aynı malzemeninkinden daha yüksek olmayan bir yorulma sınırını haizdir ve ayrıca da bunlar daha gevrek olurlar. Gerçekten çok sert, çok gevrek çelik türlerinde çok yüksek aşınma dereceleri gözlenmiştir. Bu, hem abrasif parçacıkların

kolay oluşması, hem de, gevrek kırılmanın sonucu olarak, her bir parçacığın (1) denkleminin verdiğiinden daha iri hacimde malzeme kaldırma eğiliminde olmasından ileri gelmektedir.

Gevrek malzemelerin (1) denkleminin verdiğiinden daha büyük bir aşınma hacmi hasıl etmelerine karşılık yüksek derecede elastik malzemelerin yine bu (1) denkleminin gösterdiğiinden çok küçük bir aşınma hacmi meydana getirdikleri akılda tutulacaktır: malzemenin abrasif tarafından deformasyonu, plastik deformasyon yerine elastik olarak yutulur. Buna bağlı olarak, yüksek derecede elastik malzemeler veya elastometreler (örneğin kauçuk) abrasif çevrelerde sık kullanılır ve çoğu kez, daha normal elastik şekil bozulma sınırlı daha sert ve kuvvetli malzemelerin yerini alırlar.

A.III.9.2 Yüzey yorulma aşınması

İki tip kırılma aşınması mutattır, ilki, yuvarlanma uygulamalarında, ezcümle çarklar ve rulman yataklarında, ikincisi de, yuvarlanma ya da kayma halinde gevrek, seramik malzemelerde görülür.

Genellikle yüzey yorulma aşınması diye anılan bunlardan ilki büyük pratik önem taşır şöyle ki yuvarlanma teması elementlerinin başlıca kırılma türünü oluşturur. Bu aşınma şekli, malzemelerin genel yorulma olgusuna yakından bağlıdır zira temas eden' malzemelerde gerilmelerle kırılmayı meydana getirmek için gerekli saykl arasında bir karakteristik karşılıklı ilişki mevcuttur. Mamafih bunda çok belirgin sapmalar da görülmektedir.

Bir tipik uygulamada, temas eden komponentlere çok iyi bir yüzey düzgünlüğü verilir şöyle ki uygulanan dikey yükleme altında deformasyon plastikten çok elastik olur. Mekanizma çalıştığıında, yüzey arasındaki etkileşim başlıca bir yuvarlanma hareketinden ibaret olur, buna çok kez bir küçük (~ % 1) kayma komponenti biner. Sıcaklık genel olarak iyice ılımlı (95 °C tan az) olup yağ veya gres yağlaması sağlanır. Bu koşullar altında yapışkan, abrasif ve korosif aşınma yok sayılır ve hareket uzun süreler (örneğin milyonlarca dönüş), yüzey görünümünde belirgin bir değişme olmadan devam eder.

Mekanizmanın çalışması devam ettikçe yuvarlanma yolunda malzemenin gerilme ve gevşemesi yer almayı sürdürür. Uzun süre malzeme bir gerilme sayklanmasından etkilenmemiş gibi olur ama aniden, belki birkaç bin saat çalışmasından sonra, yüzeyden bir parçacık ayrılır ve bundan sonra yüzeyin bozulması, bundan parçaların kopması hızlanır. Yorulma aşınması sürecinin karakteristikleri şöyledir:

1.)Kalkan parçacıklar büyük olma eğilimindedirler, yani boyutları, malzeme için karakteristik yapışkan aşınma parçacığı boyutundan (30/i mertebesinde) çok, gerilme altında temas alanınkilere (1000/i mertebesinde) daha yakın görünürler.

2.)Birleşmenin ömrü belirgin olarak yüke bağlı olup münasebet genellikle

$$t = \frac{\text{sabit}}{N^3} \text{ tipindedir.}$$

Burada t , kırılmaya kadarki zaman, A_f de yüküdür. Küresel uçlu temas eden malzemelerin elastik deformasyonunda maksimum gerilme yükün küp kökü ile değiştiğine göre, yukarıdaki

denklem

$$t = \frac{\text{sabit}}{\sigma_m^9}$$

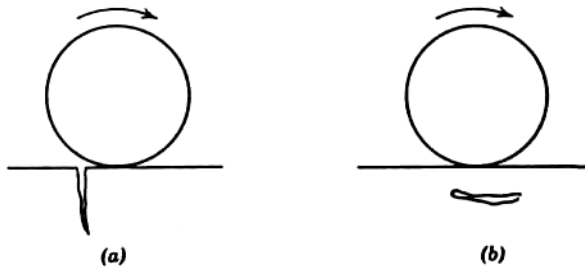
şeklinde yazılabilir a_m maksimum elastik gerilmedir

3.) Bahis konusu ömür, görünürde eş koşullar altında çok büyük, 200'e l'e kadar varan deneysel dağılımlar gösterir. Yapışkan aşınma koşullarında dağılma, yine büyük olmakla birlikte genellikle l'e 10 faktörü kadardır.

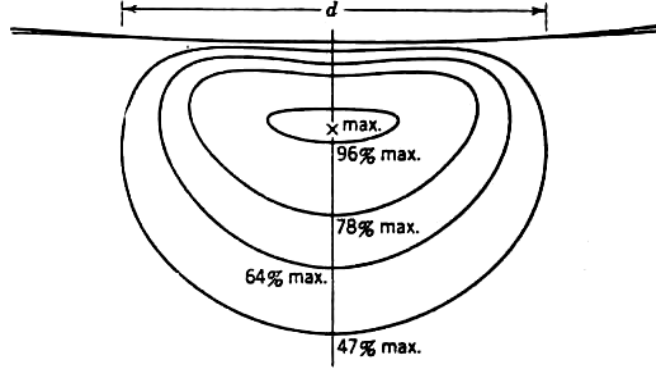
Yüzey yorulma aşınmasının birçok karakteristiği, kitle numunelerinin yorulma deneylerinde gözlenenlerin tamamen aynıdır. Her bir gerilmenin bireysel olarak iyice elastik sınır içinde olduğu gerilme sayklarının biriken (kümülatif) uygulamasının bir malzemenin kırılma ile tahrip olmasına sebep olduğu genel prensibi, her iki halde de müşterektir. Ömrün, gerilmenin bir yüksek üssü ile (10^3 ilâ 10^6 gerilme sayklı sınırları içinde, yüzey aşınma yorulması ve keza genel yorulma için 9) ters orantılı oluşu bir başka benzerliktir, tıpkı yüzeye aktif çevrenin yaklaşık 10 faktörü kadar ömrü kısaltma etkisine sahip olması gibi.

Adi yorulma ile yüzey yorulması arasındaki iki önemli fark, önce ömür süresinin dalgalanmalarının yuvarlama teması durumunda çok daha ciddi olup kitle halinde 10 faktörüne karşı 100' den büyük bir faktör arz etmesidir. İkincisi, adi kitle deneyinde gözlenen, altında malzemenin sonsuz bir yorulma yaşamına eriştiği bir sınır, yorulma gerilmesinin varlığı konusudur (Wohler eğrisi) Böyle bir sınır, yüzey yorulması durumunda *mevcut değildir*. Bu her iki farkın, peşinen öngörülen uzun ömrün makul ölçüde yüksek gerilme yükselmesinde yuvarlanma temas elementlerinin tasarımını ne denli zorlaştırdığı tahmin edilebilir. Böylece de, temas gerilmelerinin bazı saptanmış kesin değerler altında olduğu yuvarlanma temas elementlerinde yorulma kırılmalarının yok edildikleri güvencesi verecek tasarımlara gidilememektedir.

Yüzey yorulma aşınmasının deneysel tetkiki oldukça güçtür. Pullanma vaki olana kadar, yapılabilecek az faydalı gözlem vardır; buna rağmen bazı araştırmacılar yuvarlanma temas malzemelerinin metallografik tetkiklerini yapmışlar ve pullanmayı başlatan çatlakların bazen yüzeyde, bazen de yüzeyin altında kendini gösterdiğini bulmuşlardır (Şek. 128). Yüzey altı çatlaklarının hasıl olması muhtemelen maksimum makaslama gerilmeli ve dolayısıyla plastik akma için maksimum eğilimli noktanın yüzeyin altında yakın bir mesafede bulunmasına bağlıdır (şek. 129).



Şek. 128.- İlk başlangıç safhalarında tipik yüzey yorulma kırılmalarının görünümü, (a) yüzey çatlak; (b) yüzey altı çatlak



Şek.129.- Küre ve düzlemin elastik temasında gerilme maksimumunun pozisyonu