

CHAPITRE VI

USURE DES SURFACES DE CONTACT

VI.1. Introduction

L'usure est une conséquence du phénomène de frottement entraînant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. Elle est généralement dommageable, mais peut aussi être bénéfique, par exemple lors du rodage, l'affûtage de l'outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture à l'aide de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier.

VI.2. Définition de l'usure

L'usure est la perte progressive de matériau due à l'interaction de surfaces en mouvement relatif (l'une par rapport à l'autre).

VI.3. Paramètres agissants sur l'usure

Les paramètres qui influent sur l'usure sont :

- Les conditions opératoires : la charge, la température, la vitesse, la pression de contact ;
- L'aire de contact ;
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couches d'oxyde);
- Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté);
- L'absence ou la présence du lubrifiant.

VI.4. Modèles d'usure

On classifie les modèles d'usure selon les mécanismes qui les génèrent. Ces mécanismes repérés dans des cas différents de contacts, peuvent s'appliquer tous en même temps, certains étant prépondérants par rapport à d'autres en fonction des conditions imposées.

VI.4.1. Usure par adhérence (usure adhésive)

L'usure adhésive est le modèle le plus fondamental, elle est due par déformation plastique des aspérités en contact direct métal-métal et pénétration des films de surface puis au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions qui se forment entre ces aspérités, elle est accompagnée d'un échauffement au moins local des surfaces métalliques.

Le glissement n'est possible que par :

- Cisaillement du corps le plus tendre lorsque la soudure est résistante (figure VI.1a) ; des particules du corps le plus tendre (1) sont transférées sur le corps le plus dur (2) (figure VI.1b), la substance du corps (1) finit par frotter sur elle-même.
- Cisaillement des micro-soudures lorsqu'elles sont moins résistantes que les corps, il n'y a pas de matière arrachée.

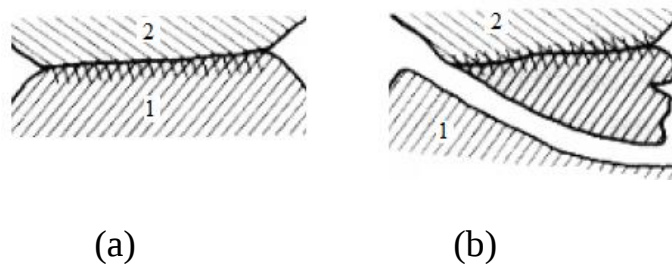


Figure VI.1: Transfert d'une particule (a) soudure d'une aspérité ;(b) arrachage d'une particule.

Un arrachement de matière peut se produire lorsqu'ils sont séparés par un mouvement dû à une force normale ou tangentielle (usure douce).

L'usure sévère apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces. D'où la formation d'un « film de transfert », collé à la surface antagoniste.

Le grippage est le phénomène le plus sévère de l'usure adhésive, il s'explique par une grande affinité entre les surfaces en contact et un fort échauffement du contact dû au frottement peut entraîner l'apparition de microsoudures entre les aspérités des surfaces.

Les débris sont des fragments métalliques de dimensions relativement importantes, ils subissent toute une série de transformations (oxydation, écrouissage...), et avant de quitter l'interface, ils sont en moyenne cinquante fois plus gros que les particules initiales. Dans ce cas, l'usure s'appelle l'usure adhésive en régime sévère.

- Exemples des pièces usées par usure adhésive

La figure VI.2 montre un tourillon qui porte diverses traces d'usure. À gauche, on trouve des stries continues probablement dues à un phénomène d'abrasion. À droite, les stries sont beaucoup plus chaotiques, avec des traces d'arrachements caractéristiques de l'usure adhésive.



Figure VI.2 : Tourillon avec diverses traces d'usure.

La figure VI.3 est un roulement, provient d'une turbine d'hélicoptère, a été éliminé à cause des traces brunes suspectes bien visibles sur la bague intérieure. Il vaut mieux, évidemment,

que l'on ne sache pas ce qui se serait passé si la dégradation s'était poursuivie, il s'agit vraisemblablement d'un début de grippage.



Figure VI.3 : Début de grippage d'un roulement.

VI.4.1.1. Quantification de l'usure adhésive

Le premier travail sur l'usure daté du 19ème siècle. Il concernait la perte de poids de pièces de monnaie anglaises. Certains auteurs ont cherché à relier le taux d'usure adhésive aux différents paramètres qui interviennent dans le frottement. C'est ainsi que J. F. Archard émettant le premier, l'idée d'une certaine probabilité pour qu'une particule d'usure puisse se former à partir de la jonction entre deux aspérités, a proposé l'expression :

$$V = K \frac{NL}{H}$$

V : Taux d'usure adhésive ou le volume arraché [mm³].

N : Charge normale appliquée [N].

L : Distance de glissement [m].

H : Dureté du matériau le plus tendre dans le contact.

K : Considéré comme le coefficient d'usure, varie de 0.1 à 0.01 pour l'usure sévère (frottement sec, contact métal-métal), il est de l'ordre de 10⁻⁵ en régime d'usure modérée

(frottement lubrifié, surfaces oxydées) et peut atteindre 10^{-6} à 10^{-7} pour un frottement bien lubrifié.

Le coefficient d'usure varie lui-même avec les autres paramètres tribologiques comme l'environnement, la nature des corps frottants, la vitesse de glissement, la charge normale.

VI.5. L'abrasion

VI.5.1. Définition de l'abrasion

Est une usure produite par le frottement de particules entre elles ou entre deux surfaces dont au moins l'une est abrasive.

VI.5.2. Définition de l'usure abrasive

Dans le glossaire de l'organisation de coopération et de développement économique l'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures. Donc l'usure abrasive est le résultat du frottement de glissement par labourage ou par déformation plastique. L'usure peut se faire à deux corps, directement à partir des solides en contact ou bien à trois corps comme l'indique le schéma (figure VI.4).

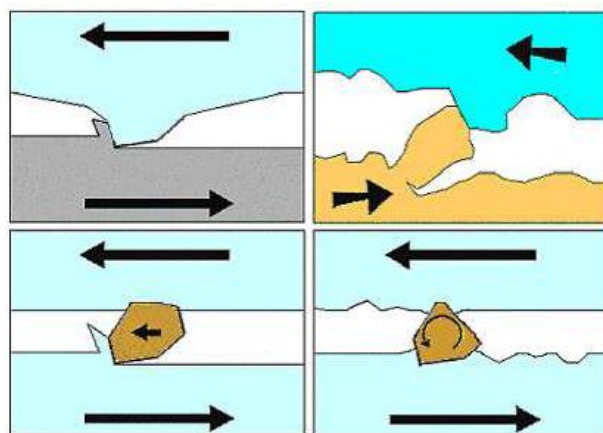


Figure VI.4: Usure abrasive.

Il faut noter que l'usure abrasive existe toujours quelque soit le système mécanique. En effet, les débris d'usure générés par les autres modes (adhésions ou fatigue) sont généralement plus durs que les surfaces en contact et par suite participent à l'abrasion, ainsi que les grains abrasifs constitués de poussières ou de sable de fonderie.

VI.5.2.1. Abrasion à deux corps

Une usure abrasive se fait par les aspérités ou protubérances dures d'une des surfaces sur l'autre plus tendre, appelée "abrasion à deux corps" (figure VI.5) Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

En général, un matériau mou et malléable conduit à une usure uniforme tandis que pour un matériau plus dur, l'usure est plus localisée dans la région interlamellaire où les couches d'oxydes forment des points faibles et entraînent le décollement des lamelles.

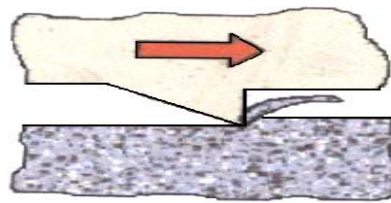


Figure VI.5 : Usure abrasive à deux corps.

VI.5.2.2. Abrasion à trois corps

Une usure abrasive dite "à trois corps" provoquée par des particules dures (figure VI.6) soit véhiculées entre les deux surfaces en contact, soit enchâssées dans l'une d'elles, généralement la plus tendre. L'accumulation de débris d'usure entre les corps finit par constituer une couche intermédiaire, le troisième corps. Selon Johnson, le cisaillement de la couche intermédiaire est la principale source de frottement. Le rodage, le polissage à la pâte ou à la poudre sont des genres d'usure abrasive à trois corps.

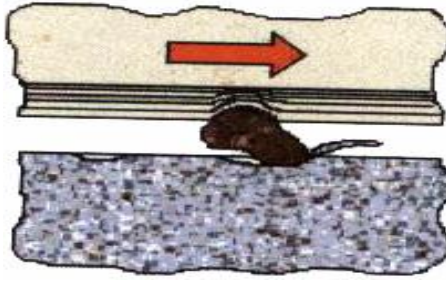


Figure VI.6: Usure abrasive à trois corps.

D'après TABOR, la dureté des particules est en moyenne de 20% supérieure à celle de la surface initiale.

La quantité du métal du sillon abrasif éliminé de la surface sous forme de particules d'usure par rapport à celle affectée par la déformation plastique est relativement faible, environ 10% à 20% en moyenne. Cette quantité enlevée dépend de nombreux paramètres et plus particulièrement par :

- La dureté relative de la surface abrasée et de l'abrasif. Lorsque la dureté de la surface rayée approche celle de l'abrasif, celui-ci s'émousse, diminuant son aptitude à la coupe.
- La forme de la partie active de l'abrasif, si elle présente des angles vifs, convenablement orientés par rapport au sens de glissement (figure VI.7a), l'abrasion sera analogue à un processus de coupe et la trace laissée sera désignée comme une rayure de microcoupe, contrairement, si elle est arrondie est polie, il y'aura un très peu de matériaux enlevé (figure VI.7b).



(a)

(b)

Figure VI.7 : Mécanisme de l'abrasion ; (a) par coupe ; (b) par déformation plastique.

- Si les grains abrasifs roulent entre les deux surfaces provoquent moins d'usure que s'ils glissent ou s'incrudent dans l'une des deux surfaces.

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'abrasif et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- S'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes.

- S'ils sont isolés, et interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées.

- S'ils sont continus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.

- S'ils sont continus aussi et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure et sa surface de contact est rugueuse.

Pour rayer une surface il suffit d'une autre plus dure de 20% à 25%.

- Exemples des pièces usées par abrasion

La figure VI.8 montre l'allure typique des stries d'abrasion sur un tourillon. Il s'agit ici d'une usure abrasive à trois corps, car l'arbre tournait dans un coussinet moins dur que lui.



Figure VI.8: Stries d'abrasion sur un tourillon.

La figure VI.9 montre aussi une usure abrasive à trois corps nettement plus sévère. Elle s'est produite au niveau d'un joint d'étanchéité qui a provoqué un point d'accumulation de débris abrasifs.



Figure VI.9 : Usure abrasive à trois corps.

VI.6. Quantification de l'usure abrasive

Une loi généralisée d'usure par abrasion a été proposée sous la forme suivante :

$$V = \frac{KFL}{3H}$$

$$K = K' \lambda \left[1 - \exp \left(- \ln 2 \cdot \left(\frac{H_a}{mH} \right)^{1+2m} \right) \right]$$

Avec :

V est le volume enlevé du matériau par abrasion [m^3]

H_a : La dureté de l'abrasif [N/mm^2]

H est la dureté du matériau soumis à l'abrasion [N/mm²]

m : Le coefficient légal d'abrasion constant

L est la longueur du contact [m]

F : La force appliquée [N]

λ est le facteur de l'angularité de l'abrasif

K' est un coefficient caractéristique de l'écoulement du matériau soumis à l'abrasion.

Actuellement la plupart des spécialistes s'accordent pour considérer que le taux d'usure abrasive d'une surface métallique peut s'exprimer par la relation suivante :

$$\frac{dV}{dl} = K_{abr} \frac{N}{H}$$

$\frac{dV}{dl}$: Le taux d'usure en volume par unité de longueur de glissement ;

N : Charge appliquée ;

H : Dureté de la surface la plus tendre ;

K_{abr} : Coefficient d'abrasion.

VI.7. Effet de traitement thermique sur l'usure

L'effet des traitements thermiques sur le comportement tribologique des aciers au carbone est très important.

Il apparaît que la trempe augmente la résistance à l'usure alors que le revenu la diminue.

Le durcissement par écrouissage d'une surface métallique par des grains abrasifs améliore sa résistance à l'usure.

Pour les aciers faiblement alliés, la résistance à l'abrasion s'améliore pour les éléments donnant lieu à des carbures dispersés dans la ferrite. L'addition d'une faible teneur en

manganèse améliore la résistance à l'usure d'une structure perlitique mais abaisse celle d'une structure martensitique.

Pour les aciers fortement alliés, la précipitation fine et uniforme de carbures dans la matrice est désirable pour l'augmentation de la résistance à l'usure. La meilleure structure est la structure martensitique. Par contre les aciers possédant une structure austénitique stable et homogène, comme les aciers inoxydables, ne possèdent pas une résistance à l'abrasion très élevée.

VI.8. Modes d'usure

Outre de modes d'usure cités auparavant, Il ya d'autres types tels que :

VI.8.1. Usure de corrosion

Quand le couple de frottement est utilisé dans un milieu corrosif, des réactions se produisent sur l'une ou les deux surfaces de couple de frottement ; elles ont un rôle protecteur pour la surface.

Souvent les couches dues aux réactions sont enlevées par frottement de sorte que le processus corrosif peut se répéter.

La présence de rouille est un cas particulier de corrosion dû à l'oxygène s'il y a présence d'eau dans l'atmosphère. La tribo-corrosion est un enlèvement de la couche de corrosion chimique sous une action mécanique.

- Exemples des pièces usées par corrosion

La figure VI.10 est une grosse bague de roulement, normalement montée serrée, s'est rompue. Dès lors, les petits mouvements de sa surface sur le tourillon ont entraîné

l'apparition des premiers signes de la corrosion, c'est-à-dire des zones oxydées formant autant de taches noirâtres ou rougeâtres.



Figure VI.10 : Bague de roulement usée par corrosion.

La figure VI.11 est un bout d'arbre en acier inoxydable avec une rainure de clavette, dont la face d'appui a fini par une corrosion. L'acier inoxydable s'est oxydé.



Figure VI.11 : Corrosion d'un acier inoxydable.

VI.8.2. Usure par cavitation

IV.8.2.1. Nature du phénomène

Quand la pression du fluide descend localement au-dessous d'une valeur critique, des bulles se forment soudain à partir de germes : gaz dissous, micro bulles, impuretés, rayures.

La cavitation exige un mouvement relatif entre un solide et un fluide. Elle concerne en premier les organes pour fluides, pompes, hélices de bateaux ... mais aussi certains mécanismes lubrifiés : coussinets de moteurs ou engrenages, par exemple.

IV.8.2.2. Aspect des dégâts

Des trous, à peu près hémisphériques, apparaissent hors de la zone frottante ou à sa limite, puis l'ensemble de la surface est rongé. La destruction, souvent catastrophique, est très rapide et très bruyante. C'est la cavitation que l'on entend lorsque l'eau "chante" dans une bouilloire (bouteille).

- Exemples des pièces usées par cavitation

La figure VI.12 est une roue de pompe centrifuge qui a été entièrement rongée (attaquée) par la cavitation.



Figure VI.12 : Cavitation d'une roue de pompe.

La figure VI.13 est l'usure par cavitation d'une turbine. La roue avait auparavant été rechargée par des apports d'acier inoxydable qui correspondent aux zones claires de la photographie.



Figure VI.13 : Usure par cavitation d'une turbine.

IV.8.3. Usure par oxydation

Elle résulte de l'adsorption de l'oxygène sur les surfaces métalliques mises à nu lors du frottement et des réactions chimiques de cet oxygène avec le métal. Le taux d'oxydation est contrôlé par la diffusion de l'oxygène dans les couches superficielles. L'usure se produit par écaillage de l'oxyde et émission de débris.

Si un alliage est oxydé, les produits de la réaction qui en résulte, se présentent sous forme de couches séparées ou comme une mixture hétérogène (figure VI.14).

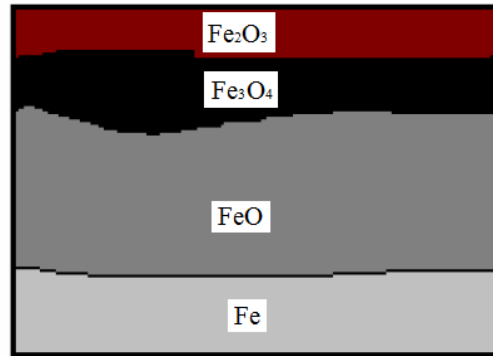


Figure VI.14 : Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer à 625 °C après 24 h.

IV.8.4. Usure érosive (érosion)

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux.

La perte de matière d'une surface solide, due au contact avec un fluide en mouvement relatif contenant des particules solides.

L'érosion enlève du matériau de la surface par déformation plastique, labourage et micro-usinage.

La figure IV.15 montre les traces d'érosion sur un coussinet de moteur par des poussières véhiculées par l'huile.

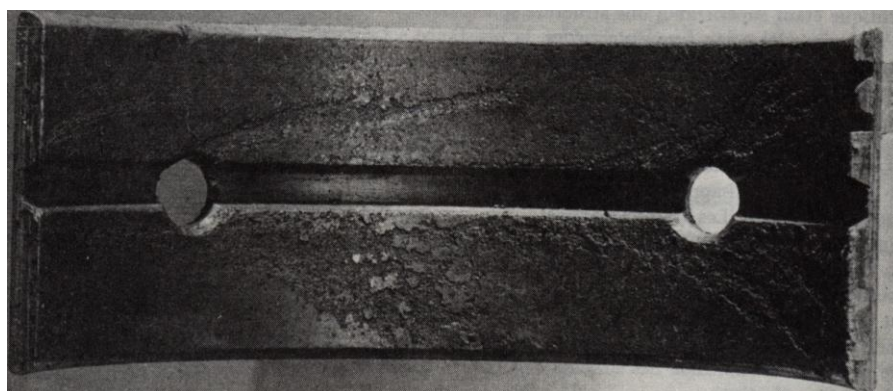


Figure IV.15 : Erosion abrasive d'un coussinet.

L'érosion cause une diminution du fini de la surface et par conséquent une augmentation du coefficient de frottement pour les deux pièces qui frottent l'une sur l'autre et une diminution de l'étanchéité dans le cas d'une soupape par exemple.

Une érosion importante diminue la résistance de la pièce et peut conduire à la rupture.

La figure IV.16 est une aube de turbine à gaz usée par érosion.



Figure IV.16: Aube de turbine à gaz usée par érosion

IV.8.5. Usure par fatigue

La fatigue est le phénomène de formation et de propagation de fissures (figure IV.17) sous l'action répétée d'efforts alternés. L'usure par fatigue est lente est induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement. Des charges trop fortes peuvent détériorer les surfaces.

On peut remarquer des déformations plastiques sur les métaux ductiles et des cassures sur les matériaux fragiles.

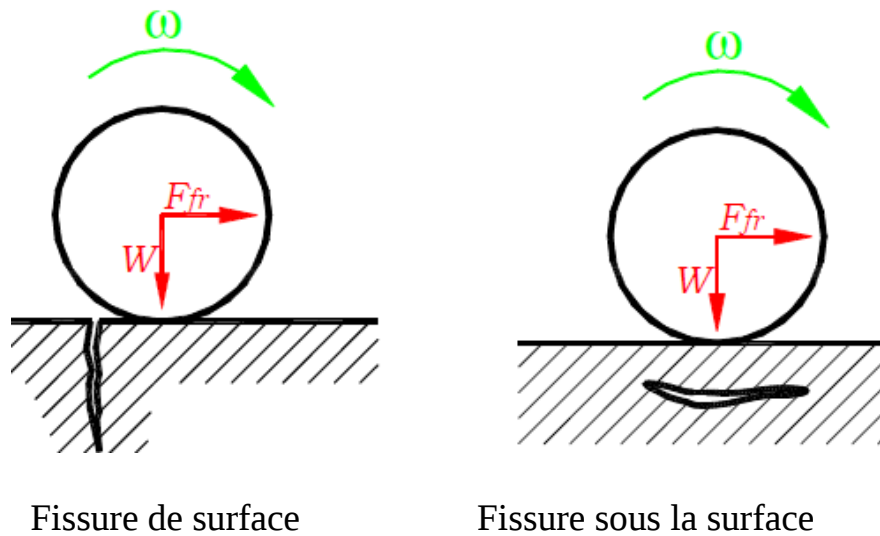


Figure IV.17 : Fissures générées par fatigue.

IV.8.6. Usure par fretting

Le fretting est un mécanisme d'usure qui se produit entre des surfaces qui ne devraient pas normalement être en mouvement relatif, mais qui en fait présentent un déplacement oscillant microscopique entre elles. L'amplitude de déplacement est de l'ordre de 1 à 100 microns, donc pratiquement imperceptible à l'œil nu. Ce type de déplacement est induit par des vibrations dans la machine ou par l'environnement. L'usure se produit pour de très petits déplacements de l'ordre de $1 \mu\text{m}$.

Les mouvements ont une très petite amplitude de telle façon que les déchets d'usure ne sont pas éliminés mais restent emprisonnés entre les surfaces (figure IV.18). Les pièces s'éloignent progressivement et sont séparées par le débris qui provoque l'usure abrasive (troisième corps).

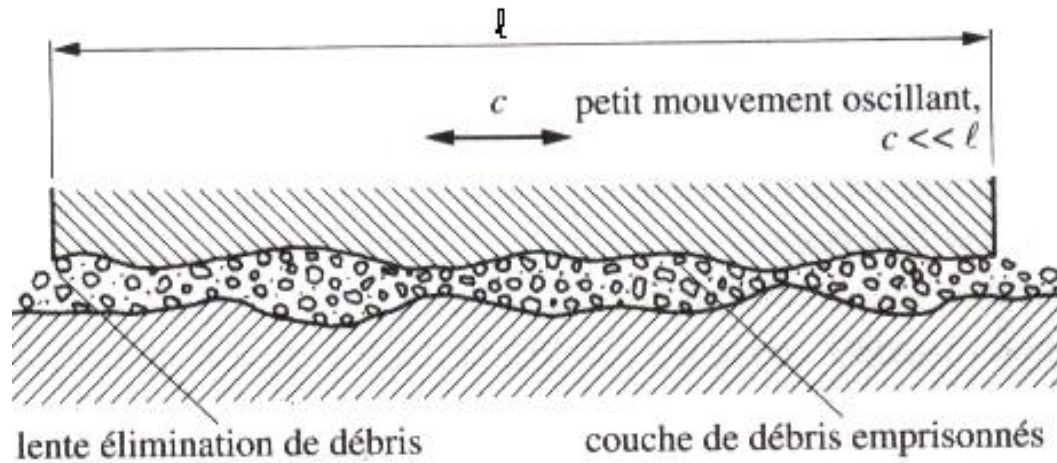


Figure IV.18 : Accumulation de débris entre surfaces avec des petits mouvements oscillants.

IV.9. Moyens pour combattre l'usure

Depuis l'antiquité on a cherché à lutter contre l'usure. En premier lieu, il convient d'empêcher les grains abrasifs d'arriver jusqu'aux surfaces de frottement par :

- L'assurance d'une bonne étanchéité des organes et mécanismes : roulements étanches, joints efficaces, soufflets élastiques....
- La filtration des fluides aptes de véhiculer des grains abrasifs, en filtrant des huiles lubrifiantes, de l'air dans le cas des moteurs thermiques et des compresseurs et parfois, du combustible pour moteurs.
- Réduire au minimum l'aération de l'huile.

Si l'abrasion est à deux corps, il est possible de jouer sur l'état de surface par des usinages appropriés qui arasent les aspérités aiguës tels que le brunissage (polissage), le rodage....

La résistance à l'abrasion est aussi obtenue par :

- Traitement de surface : Trempe superficielle, cimentation, carbonitruration, nitruration....

- Revêtement des métaux et alliages durs soit par dépôt électrolytique (chrome dur) ou par plasma : cermets (CERamique-Metal) constitués de matrice de fer, de nickel et de cobalt et d'une phase très dure à base de carbures de tungstène, du chrome de molybdène ou de titane.