

Análisis de la relación entre las propiedades de la superficie y el volumen del cuerpo desde la ingeniería de superficies

Francisco Martínez Pérez

Correo electrónico: fmartinez@ceim.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Artículo de Reflexión

Resumen

Las valoraciones de las propiedades y características en los diseños de elementos de máquina, en los que deben apreciarse propiedades volumétricas y concentradas, fundamentalmente, en las capas superficiales del elemento, son significativamente diferentes. Hoy, el análisis se realiza desde el punto de vista de la ingeniería de superficies, ciencia de reciente surgimiento. En el presente trabajo se desarrollan contenidos que permiten el conocimiento de esta nueva ciencia y su aplicación en elementos en los que deben diferenciarse las propiedades del cuerpo y la superficie. El trabajo presenta una valoración para la aplicación de exigencias superficiales y su relación con el cuerpo de la pieza, pretendiendo llegar a la formación de gradientes de esfuerzo positivos que garanticen que las exigencias en la capa superficial se cumplan, pero evitando que la frontera capa-cuerpo sea perjudicada.

Palabras clave: ingeniería de superficies, tribología, fricción, desgaste

Recibido: 5 de marzo del 2012

Aprobado: 21 de abril del 2012

INTRODUCCIÓN

El reconocer que la gran mayoría de los componentes de ingeniería podrían degradarse o fallar catastróficamente en servicios por fenómenos relacionados con sus superficies, tales como desgaste, corrosión o fatiga, llevó a comienzos de los años 80, a desarrollar el tema interdisciplinario de ingeniería de superficies. Este desarrollo fue estimulado por la creciente utilización de una amplia variedad de tecnologías de superficies: procesos de rayos láser y haz electrónico, técnicas termoquímicas por plasma, novedosos recubrimientos de ingeniería (por ejemplo el niquelado no electrolítico), implantación iónica y más recientemente, métodos dúplex de modificación de superficies. Sin embargo, es dentro de las tecnologías tradicionales de tratamiento térmico de superficies, tales como, endurecimiento por templado, nitruración y carburización, donde pueden hallarse los orígenes y principios fundamentales de la ingeniería de superficies.

Un componente de ingeniería generalmente falla cuando su superficie no puede soportar de manera conveniente los

esfuerzos o el medio ambiente al que está sometido. La elección de un material y el tratamiento superficial con las adecuadas propiedades térmicas, ópticas, magnéticas y eléctricas, y resistencia suficiente al desgaste, a la corrosión y a la degradación, es crucial para su funcionalidad.

"La ingeniería de superficies comprende la aplicación de tecnologías de superficies tradicionales e innovadoras en componentes y materiales de ingeniería a efectos de producir un material compuesto de propiedades no obtenibles en el material de base o de superficie. Frecuentemente, las distintas tecnologías de superficie se aplican a diseños de componentes de ingeniería ya existentes pero, idealmente, la ingeniería de superficies abarcaría el diseño del componente conociendo el tratamiento de superficie a aplicar". [1]

Esta novedosa rama multidisciplinaria de la ingeniería, mediante un detallado análisis tribológico de los fenómenos de desgaste, otros daños superficiales como la corrosión y de la ciencia de materiales, permite optimizar las superficies expuestas a estos procesos en válvulas, evaporadores, intercambiadores de calor, bombas y compresores centrífugos, partes y piezas mecánicas, etc., a fin de prolongar significativamente la duración del servicio.

Los tipos de desgaste más frecuentemente presentes en procesos industriales o de servicios son los de abrasión, adhesión, corrosión, picadura, erosión, *fretting*, impacto y cavitación.

Generalmente, se produce una interacción de estos mecanismos de desgaste y es así como en un sistema de succión se puede encontrar erosión y cavitación, fatiga térmica y erosión en los álabes de una turbina de vapor, o abrasión y corrosión en un tornillo de bomba de pulpa afectada por la presencia de iones Cl⁻.

Una vez que el ingeniero especialista ha determinado (diagnosticado) el o los tipos y formas de desgaste presentes en un equipo o componente, recurre a la ciencia de materiales para determinar qué aleación o recubrimiento, ya sea metálico, polimérico, cerámico o una mezcla de ellos (composites), permite prolongar su duración en servicio. El ingeniero debe determinar además el procedimiento con el cual se aplicará el recubrimiento determinado.

DESARROLLO

La selección de materiales apropiados para la elaboración de componentes en pares de fricción, se circunscribe frecuentemente a factores que tienen poco que ver con la tribología, como es el costo de los mismos, por ejemplo. El peso es un factor a considerar y también la resistencia a la corrosión. Las propiedades mecánicas, la rigidez y la tenacidad son de gran importancia en las aplicaciones de ingeniería. Aunque estos factores pueden limitar la diversidad de materiales a emplear, ellos también sirven para establecer un espectro de soluciones factibles. Lo más conveniente siempre será una selección más integral, para lo que es oportuno el empleo de mapas de selección, como los de Ashby [1].

Sin embargo, la mayoría de las propiedades enunciadas, excepto quizás la resistencia a la corrosión, son propiedades volumétricas del material y esto brinda la posibilidad de concentrarse en variar las propiedades superficiales, de mayor importancia para la tribología, mediante un espectro de diferentes métodos factibles a emplear. La modificación o recubrimiento de una superficie, con la finalidad de lograr combinaciones de propiedades en la superficie y en la subcapa, perteneciente al volumen del material, conduce a la llamada ingeniería de superficie.

El desgaste, como factor de funcionamiento adecuado de los sistemas de ingeniería, se obvia en el diseño. Sin embargo, el desgaste conduce a egresos importantes en el mantenimiento, debido a costos por reposición de elementos, capacidad de producción, pérdidas de eficiencia energética y consecuentemente de la máquina. Todo esto, según datos del profesor Rabinowicz, [2] puede llegar a representar más del 2 % del PIB de un país.

Los diseñadores o mantenedores deben tener en cuenta dos consideraciones muy importantes: el establecer la magnitud de desgaste que ocurrirá en servicio y

posteriormente tomar las medidas necesarias para su reducción, estimando, por supuesto, los aspectos económicos que ello implica. Para poder establecer la magnitud de desgaste, la cual puede ser calculada, tendrá que conocerse el mecanismo de desgaste que tendrá lugar, a través de la consulta de la literatura de cálculo especializada, [3-4] así como determinar los factores que inciden mediante la modelación físico-matemática. [4,5]

Los diversos procesos posibles de aplicar, deben ser considerados como parte esencial en el diseño de los sistemas tribológicos. En la figura 1 se puede observar un algoritmo que muestra la secuencia de pasos en el diseño de un sistema tribológico.

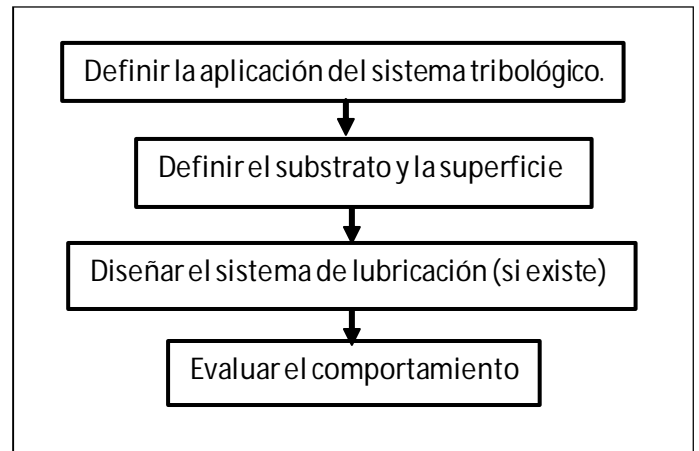


Fig. 1. Algoritmo que muestra el sistema de pasos en el diseño de un sistema tribológico.

Los metales y sus aleaciones se encuentran entre los materiales más seleccionados para componentes mecánicos. Sus composiciones y microestructura están normalizadas, a veces hasta internacionalmente y por tanto sus propiedades mecánicas son más fáciles de predecir. Los materiales no metálicos son menos normados por lo cual sus propiedades, aún con composiciones idénticas, tienden a variar. Sin embargo, en los materiales, aunque sus propiedades mecánicas y físicas sean iguales, sus respuestas ante aplicaciones tribológicas no pueden ser dadas mediante simples números.

La selección de materiales y métodos de obtención de las superficies ingenieriles, para las aplicaciones tribológicas, depende en gran medida, del mecanismo y tipo particular de desgaste predominante. Por tanto, deben ser analizadas las selecciones de materiales para resistir el desgaste en dependencia del tipo de desgaste de que se trate.

La variación de los parámetros de operación de todo sistema tribológico, estará limitado por los valores de dichos parámetros en el funcionamiento del sistema. Así, la disminución de las presiones actuantes sobre las superficies de interacción, dependerá de la carga aplicada, pero esta, a su vez, estará condicionada por los factores de diseño. No obstante, la presión dependerá del área real de contacto y

esta de las calidades superficiales de ambos elementos del par tribológico. Cambios de la presión o de la velocidad de desplazamiento pueden variar el mecanismo de desgaste, por lo que estos aspectos todos deben ser tenidos en cuenta. Es por ello, que el conocer los valores de la magnitud del desgaste que se produce, es esencial para esta etapa del diseño o el rediseño de los pares de fricción.

Cuando el tipo de desgaste actuante es el de rozamiento (*fretting*), los parámetros de desplazamiento entre las superficies y los esfuerzos actuantes, son los esenciales a tener en cuenta. Adicionalmente, el control del acceso de oxígeno como medio ambiental debe ser controlado. En un diseño óptimo para este tipo de sistema, además de los factores analizados, hay que considerar otros, como la fuerza que actúa sobre la unión de ambos elementos para evitar el desplazamiento de uno con respecto al otro, la temperatura que pueda generarse, la diferencia en la expansión térmica de ambos elementos del par y por probables fuentes de vibraciones.

Si el desplazamiento tiene lugar entre superficies de deslizamiento, como es el caso de los cojinetes, el propio desplazamiento no puede ser eliminado, pues es intrínseco del par; en este caso un parámetro fundamental es el de la tracción de la superficie que puede generar un elemento del par sobre el otro. Aquí, el análisis debe basarse en la disminución de la fuerza normal actuante o la fricción que se produce en el par.

Cuando el mecanismo de desgaste actuante es el de la fatiga por contacto, como es el caso de los engranajes, los seguidores de levas y los rodamientos, resultan esenciales tres factores, la cantidad de ciclos de carga actuantes, que no puede ser variada y los esfuerzos de contacto, donde no solo hay que considerar su posible reducción, sino el valor de resistencia de los materiales del par, sobre todo aquel de desgaste más probable. Para la reducción de los esfuerzos actuantes resultará esencial el valor de la carga y la geometría de la misma.

Si el tipo de desgaste es abrasivo o erosivo, provocado por partículas duras, un parámetro a considerar será el de la remoción de las partículas del sistema; tal, por ejemplo, en el caso de partículas contaminantes o de desgaste en el lubricante. Como la dimensión de las partículas grandes tiene un mayor efecto en estos desgastes que las pequeñas, será de gran importancia la eliminación de estas partículas, mediante filtrado o separadas por inercia. No obstante, la relación entre la dureza del material H_m y la dureza del abrasivo H_a , deberá superar el valor de 0,85 ($H_m/H_a \geq 0,85$). En la erosión, un parámetro esencial es el de la velocidad de impacto de las partículas sobre la superficie, siendo también esenciales el ángulo de incidencia de las mismas, así como la densidad del material impactado. En el desgaste hidroerosivo, el evitar ángulos agudos de variación en el movimiento del fluido es un aspecto a tener en cuenta.

La lubricación es un método poderoso para reducir la magnitud del desgaste en cojinetes y otros pares de fricción.

Considerando K , una constante que representa un coeficiente de desgaste en el caso de deslizamiento lubricado, su valor puede resultar significativamente bajo si se consiguen condiciones hidrodinámicas de lubricación. aunque estas no pueden mantenerse siempre; es decir, cuando estas pasan a lubricación límite, el valor de K puede alcanzar valores del orden de 10^{-6} , dependiendo de las propiedades del lubricante empleado. K es una constante, que en la ecuación de Archard para desgaste deslizante, es:

$$k = QH/W \quad (1)$$

Siendo Q la magnitud de desgaste que depende del contacto entre todas las asperezas; H la dureza del material que se desgasta y W la carga normal aplicada. Valores aceptables de K según manuales de ASM [6-8] se muestran en la tabla 1.

| Tabla 1 Valores típicos del coeficiente K para desgaste lubricado por deslizamiento | |
|--|----------------------|
| Tipo de lubricación | K |
| Hidrodinámica | $< 10^{-13}$ |
| Elastohidrodinámica | $10^{-13} - 10^{-9}$ |
| Límite | $10^{-10} - 10^{-6}$ |
| Lubricación sólida | 10^{-6} |
| Sin lubricación (desgaste severo) | $10^{-4} - 10^{-2}$ |

Es evidente que el desgaste deslizante en condiciones de lubricación hidrodinámica, resulta el estado más deseable y en el diseño, se deben tomar todas las medidas para propiciarlo en las condiciones de operación. El factor más importante que determina el régimen de lubricación, es el espesor mínimo de la capa lubricante comparado con las rugosidades superficiales, que puede ser calculado por nomogramas especializados, teniendo en cuenta un factor integrador de todos los parámetros influyentes (generalmente identificado como factor λ) y que tiene en cuenta la relación entre el espesor mínimo de capa de lubricante y la suma de las rugosidades superficiales de ambas superficies del par. [4,7]

Para la valoración de las diferentes fórmulas en el cálculo de desgaste en función del tipo de desgaste actuante, puede consultarse el algoritmo desarrollado al respecto por Martínez. [4]

Por lo general, los mayores valores de K se dan en condiciones de deslizamiento metal-metal, menores que los obtenidos en condiciones de deslizamiento entre no metal-metal, así como entre no metal-no metal. Si las condiciones son de deslizamiento metal-metal, de iguales características, el valor de K es aún mayor. Si las condiciones de ambos

metales del par difieren, el valor de K disminuye y depende, esencialmente, de la compatibilidad tribológica de ambos metales, entendiéndose por compatibilidad tribológica, la facilidad de que se establezca entre ambos metales valores elevados del componente molecular de la fricción. [4,7] Esta posibilidad está fuertemente relacionada con la estructura molecular y cristalina de ambos elementos del par, así como con el valor de su solubilidad en el estado sólido, lo cual se deduce de las características del diagrama de equilibrio formado por la interacción de ambos metales. En la figura 2 se muestra un mapa, en el que se puede apreciar la mutua solubilidad de pares de fricción formados por dos metales puros.

Tanto las combinaciones señaladas como las completamente insolubles, que muestran una solubilidad despreciable en el estado sólido, así como aquellas señaladas como dos fases coexistentes en el estado líquido, dan lugar a pares tribológicamente compatibles. Los pares de metales idénticos son, por supuesto, completamente y mutuamente solubles, y muestran poca compatibilidad. Otros pares muestran diferentes proporciones de solubilidad, como puede observarse en el mapa. En general, los pares de deslizamiento con elevada solubilidad mutua, muestran baja compatibilidad tribológica y por tanto valores relativamente altos de K ; una baja solubilidad mutua, que lleve a una buena compatibilidad tribológica, se necesita para obtener bajos valores de K .

La solubilidad mutua no es el único factor que influye en la compatibilidad, la cual también está asociada con las propiedades de las películas superficiales (usualmente óxidos) en los pares de deslizamiento. La ausencia de películas significativas de óxido en los metales nobles tales como oro, plata platino y rodio, tiende a estar asociada con bajos valores de K , lo que demuestra que los mecanismos oxidativos desempeñan un papel importante.

Algunos metales con estructura hexagonal compacta, también muestran un comportamiento anormal, asociado con su limitada ductilidad, comparada con la de los metales de estructura cúbica. El titanio, el zirconio y el hafnio, por ejemplo, presentan una reducción en el valor de K relativamente muy bajo, cuando se lubrican con cualquier lubricante hidrocarbonado, en comparación con la que tienen si trabajan uno contra otro sin lubricación.

La dureza de los aceros y de otros metales que forman capas de óxido durante el proceso de deslizamiento, es de importancia al determinar la estabilidad de esa capa y por tanto del mecanismo de desgaste predominante. Si el metal es lo bastante duro para ofrecer un suficiente soporte mecánico a la capa de óxido, tendrá lugar un desgaste medio con bajos valores de K mediante un mecanismo de oxidación.

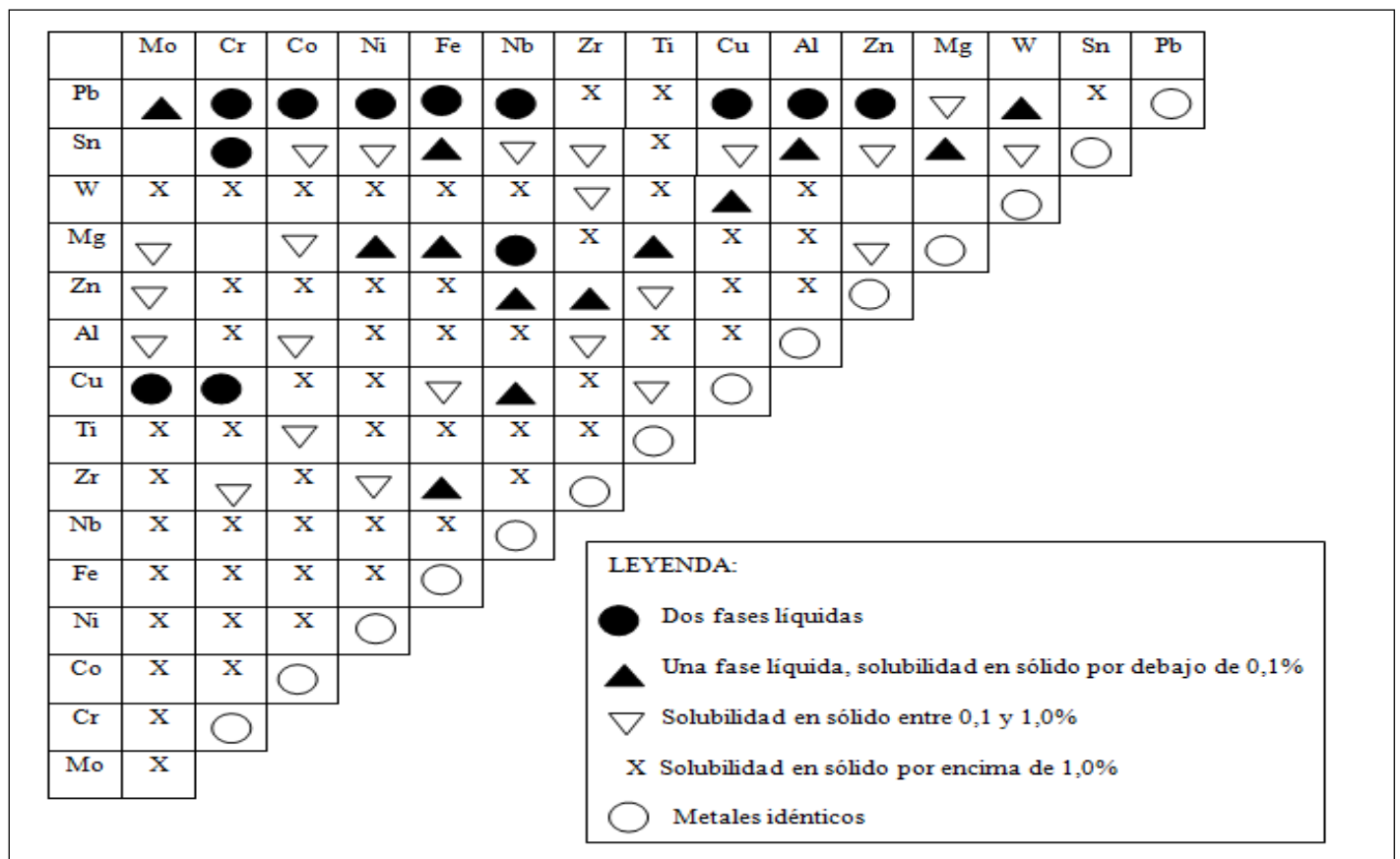


Fig. 2. Mapa que muestra la solubilidad mutua relativa de pares de metales puros, definida a partir de su diagrama de fase binario. [9]

Así, la dureza puede tener una fuerte influencia en la resistencia al desgaste adhesivo de algunos metales, pero aunque el incremento de la dureza de una partícula de una aleación puede repercutir en la disminución de su desgaste, la dureza no sirve siempre como un factor de predicción de la resistencia al desgaste de las diferentes aleaciones. En ocasiones, hay que considerar otros factores, como puede ser la presencia de componentes microestructurales como los carburos en los aceros o el papel del grafito en el hierro fundido.

La resistencia de los metales en condiciones severas de desgaste adhesivo y daño superficial con cargas normales elevadas, no siempre puede correlacionarse con su resistencia al desgaste en condiciones menos severas. Varios factores influyen en la resistencia de los materiales al daño superficial por deslizamiento: la efectividad de la capa superficial para prevenir la adhesión, la resistencia de la adhesión una vez que la película se rompa y la extensión de la unión formada. La solubilidad sólida mutua como indicador de la resistencia de la fuerza adhesiva, desempeña algún papel; los metales que se unen fuertemente tienen más tendencia al daño superficial por deslizamiento. Los metales hexagonales con un número limitado de planos de deslizamiento, tienen menor tendencia a este tipo de daño que los metales de estructura cúbica, presumiblemente por su menor ductilidad.

Algunas investigaciones han mostrado que aquellos metales y aleaciones con un alto grado de endurecimiento deformacional, presentan una menor tendencia al daño superficial durante el deslizamiento; sin embargo, este factor no es infalible en su pronóstico. Por ejemplo, los aceros austeníticos, aunque son de alto endurecimiento deformacional, muestran un alto daño superficial en este tipo de proceso, cuando se transforma su estructura en martensita. La dureza por sí sola es un pobre indicador de la resistencia al daño superficial durante procesos de deslizamiento: en los aceros, por ejemplo, una alta concentración de carburos o nitruros muestran una alta resistencia al proceso de daño superficial por deslizamiento, mayor que cuando se obtiene una dureza similar, pero con menor concentración de estas partículas duras y frágiles.

En la figura 3 se muestra un esquema comparativo de valores típicos de coeficientes de desgaste K de distintos materiales en condiciones de deslizamiento con diferentes formas de lubricación.

Los recubrimientos duros o las capas depositadas por difusión, que son también de una ductilidad muy limitada, presentan una adecuada resistencia a este tipo de proceso. Las superficies rugosas, preferiblemente las de estructuración aleatoria (por ejemplo, las que se generan mediante *sand blasting*), generalmente incrementan la resistencia al daño, probablemente debido a que el crecimiento de la unión está limitada por las irregularidades superficiales que el *sand*

blasting genera. Por el contrario, superficies pulidas tienen una mayor probabilidad al daño.

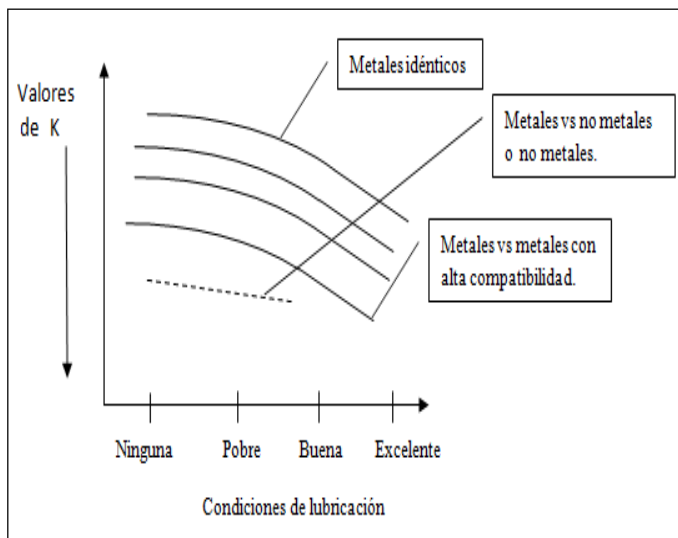


Fig. 3. Valores típicos de coeficientes de desgaste K de distintos materiales en pares de deslizamiento con diferentes condiciones de lubricación.

Los materiales cerámicos sometidos a deslizamiento moderado pueden tener coeficientes de desgaste tan bajos y aún menores que los de metales disímiles. Este hecho unido a su elevada dureza, hace que los materiales cerámicos puedan presentar valores de desgaste significativamente menores que los metales. Sin embargo, el empleo volumétrico de materiales cerámicos presenta algunas limitaciones para las aplicaciones tribológicas. Sus propiedades mecánicas (especialmente la tenacidad a la fractura) pueden no resultar adecuadas para las exigencias que se necesitan, tales como el producirlas en las formas apropiadas por ejemplo, mediante el empleo de la metalurgia de polvos, generalmente con elevados costos, y también la posibilidad de superficies de fractura de escalas pequeñas pero que conducen a desgaste severo, lo que exige un gran cuidado en el diseño. No obstante, los componentes integralmente de materiales cerámicos pueden resultar muy duraderos para algunos procesos tribológicos: por ejemplo, bujes de alúmina y sellos en bombas de agua, componentes de válvula de nitruro de silicio y cabezas femorales de alúmina, así como copas en implantes de cadera.

Algunas de las desventajas del empleo volumétrico de materiales cerámicos en elementos de pares de fricción, pueden ser obviadas, empleando el material en forma de depósitos en un sustrato metálico, mediante recubrimientos cerámicos proyectados por polvos en forma de plasma, por deposición física al vacío (PVD) o química al vacío (CVD); métodos que confirman un grupo importante de la ingeniería de superficies. En todos los empleos tribológicos de los materiales cerámicos, el uso de la lubricación es muy conveniente, ya que reduce la tracción superficial y la posibilidad de fractura local que conduce al desgaste severo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la posible reacción química de un lubricante no adecuado con la superficie.

Los materiales poliméricos son poco empleados como materiales resistentes al desgaste, siendo usados por lo común como cojinetes de deslizamiento, a veces en condiciones de rozamiento. Sin embargo, algunos materiales poliméricos, de suficiente resistencia, pueden ser empleados como elementos volumétricos en aplicaciones tribológicas, siendo significativo el uso del nylon (poliamidas) y sulfuros de poliéster; además estos materiales, en la mayoría de las veces, son empleados como composites base polimérica, fortalecidos con rellenos adecuados. Estos materiales son utilizados en engranajes poco cargados, aunque se emplean polímeros reforzados con fibras de carbón en algunos engranajes para carros de carreras, los que combinan poco peso y buenas propiedades tribológicas en comparación con elementos similares fabricados de acero forjado.

La gran diversidad de materiales posibles de aplicar en superficies de piezas ingenieriles permiten al diseñador una selección amplia, en lugar de utilizar materiales volumétricamente iguales al de su superficie.

La figura 4 muestra el amplio rango de combinación de profundidad de capa y de dureza que puede obtenerse en las superficies por estos métodos.

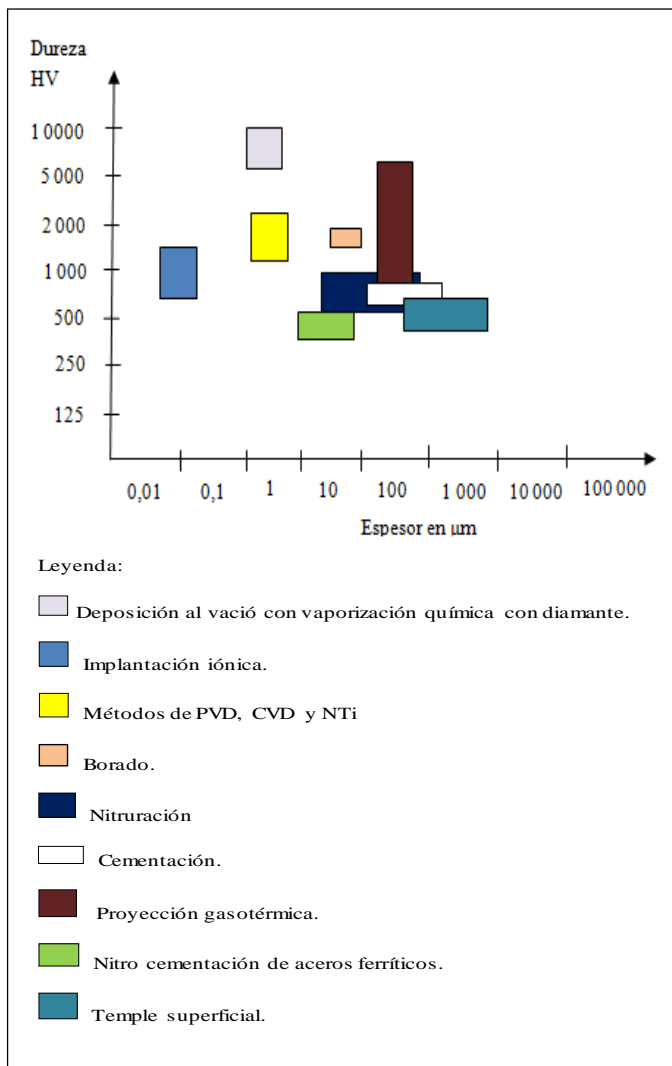


Fig. 4. Profundidades y durezas típicas de diferentes formas de recubrimientos y endurecimientos superficiales.

Después de observar la figura 4, se llega a la conclusión de que diferentes métodos ofrecen distintas posibilidades de combinación de profundidades y dureza de la capa superficial. Es de destacar que faltan algunos métodos como el níquel químico, el niquelado, el cromado, el fosfatado y otros. Aquellos métodos como las deposiciones superficiales con PVD, CVD o las implantaciones iónicas que producen solo capas muy finas de gran dureza, serán útiles en aquellas aplicaciones con una extensión de desgaste mínima, donde el esfuerzo actuante en la superficie decrezca rápidamente durante el trabajo, de forma tal, que la delgada capa superficial no sea eliminada. Esto está asociado con que se alcance la etapa de interacción elástica rápidamente. En las aplicaciones de los elementos ingenieriles de precisión como las matrices y algunos cortadores por fresado, estos métodos pueden brindar gran beneficio en el trabajo. Fundamentalmente el recubrimiento por vaporización al vacío con NTi y la aplicación de los carburos cementados, fabricados por PM, pueden alargar de manera significativa la vida útil en elementos de corte. [10]

En casos en que los esfuerzos de contacto penetren profundamente dentro del componente, hacia toda la capa superficial o aún debajo de la misma (gradientes negativos), se necesitan de métodos que generen capas superficiales más gruesas. En una rueda dentada altamente cargada, por ejemplo, el material de la superficie empleado debe tener un elevado límite elástico, de forma que mantenga condiciones de interacción elástica durante el trabajo, exposición a esfuerzos de contacto elevados al producirse deslizamiento en el contacto. Sin embargo, el núcleo del diente del engranaje y el resto de la rueda dentada, requieren alta tenacidad de fractura y resistencia a la aparición de grietas por fatiga, por estar sometido a elevadas cargas cíclicas y en ocasiones a cargas de impacto, durante el servicio. En este caso, en que se combinan tales propiedades, es preferible el empleo de elementos de acero, con tratamientos térmicos o químico-térmicos superficiales.

CONCLUSIONES

1. Distintas tecnologías de superficie se aplican a diseños de componentes de ingeniería ya existentes pero, idealmente, la ingeniería de superficies debería abarcar el diseño del componente conociendo el tratamiento de las superficie a aplicar.

2. No existe una correlación general entre el valor del desgaste y el coeficiente de fricción, aunque el lubricante que puede estar presente como un tercer cuerpo o como constituyente de uno de los elementos del par (por ejemplo, el grafito en los hierros fundidos o el sulfuro de molibdeno en algunos materiales de composición de base nylon), tiende a reducir tanto el valor del desgaste como la fricción. Aún la pobre lubricación es mejor que ninguna para reducir el valor del desgaste.

3. Debe evitarse el empleo de materiales idénticos en el desgaste por deslizamiento. Se aconseja el empleo de materiales metálicos de alta compatibilidad, o sea, que presenten en sus diagramas de equilibrio muy poca o ninguna solubilidad en estado sólido.

4. La elevada dureza superficial es conveniente en muchas ocasiones y puede ser lograda por diferentes métodos de ingeniería superficial, tales como PVD, CVD, tratamientos térmicos o químicotérmicos superficiales.

5. En la capa externa de los aceros es conveniente la presencia de carburos o nitruros, aún cuando se reduzca algo la dureza superficial.

6. Superficies que presenten un alto índice de endurecimiento por deformación, son resistentes al desgaste adhesivo severo, al abrasivo y al decapado.

7. En el desgaste erosivo son importantes los factores de densidad del material impactado, la velocidad de impacto y el ángulo de incidencia en el choque.

8. Las capas superficiales logradas por métodos de PVD, CVD, implantación iónica, nitruración o cementación son resistentes al desgaste por deslizamiento. La alta dureza y la baja ductilidad son beneficiosas en estos casos.

REFERENCIAS

1. **ASKELAND, D.** "Ciencia e ingeniería de los materiales". 4ta. ed., México:International Thompson Editores, S.A.,2004, 1004 pp. ISBN 970-686-361-3.
2. **STOLARSKI, T. A.** *Tribology in Machine Design*. Heinemann Newnes, Oxford, 1990, 298pp. ISBN O-8311-1102-X,
3. **HUTCHINGS, I. M.** *Friction and Wear of Engineering Materials*. Department of Materials Science and Metal-

lurgy, University of Cambridge, United Kingdom, 1 992., 272 pp., ISBN-0-340-56184-X,

4. **MARTÍNEZ, F.** "Tribología Integral". México: Editorial Noriega, 2 011. ISBN:978-607-05-0271, 320 pp.
5. **HEBDA, M. y CHICHINADZE, A.** "Manual de Tribotecnia". t. 1, Moscú: Mashinoostroenie, 1989, 397 pp. ISBN-5.217-00616-1.
6. **GLAESER, W.** *Materials for Tribology*, London: ELSEVIER, 1992, 255 p. ISBN 0-444-88495-5.
7. *Friction, Lubrication and Wear Technology*, ASM Handbook, vol. 8, 943 pp. ISBN 087170-380-7, 1992.
8. **ZAMBELLI, G.** *Materiales en contacto*. Premiere Edition, Lausanne, 2000, 337 pp. ISBN 2-88074-338-9.
9. **RABINOWICZ, ERNEST.** "Wear Coefficients-metals". *In Wear Control Handbook*. M.B. Peterson and W. O. Winer Editors. New York: ASME Press,1980, pp. 475 - 506. ISBN 978-999-1656731. Library of Congress No. 80-68846.
10. **MARTÍNEZ, F.** *Tecnología del tratamiento térmico. Un enfoque sistémico*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2000. ISBN: 958-258-113-4,

AUTOR

Francisco Martínez Pérez

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Investigador Titular, Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Analysis of the Relation between the Properties of the Surfaces and of the Volumetric Body of an Element, from the Point of View of Surface Engineering

Abstract

The evaluations in regard to properties and characteristics taken into account in machine design elements are significantly different when considering the volumetric properties or the surface properties. Nowadays, the analysis is done from a new science: the surface engineering. In the present work, the fundamental aspects of this new science and its application in those cases where the characteristics of the surface properties are the essential aspects are addressed. The article introduces the considerations for the application of different treatments of the surface to obtain a positive gradient on the limits surface-body of the element.

Key words: surface engineering, tribology, friction, wear