

Ingeniería de Superficies. Aplicación en el desgaste

Surface Engineering. Application on Wear



<https://cu-id.com/2177/v31n4e10>

 **Francisco Martínez-Pérez ***

Universidad Tecnológica de La Habana-CUJAE, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN: En este artículo se introduce un nuevo concepto: La aplicación de la ingeniería de superficies. La base de este concepto es el comprender que diferentes tecnologías superficiales son aplicadas en el diseño de los componentes de ingeniería que existen, pero es necesario conocer que las superficies de ingeniería cubrirán parte del diseño del elemento, pero debe conocerse también sobre el tratamiento superficial a aplicar. Esto se debe, que las superficies con un alto grado de endurecimiento debido a la deformación son resistentes a un severo desgaste adhesivo, a abrasión y al decapado, pero no deben tener la misma resistencia a otros tipos de desgaste. Esto significa que debe establecerse una correlación entre la calidad superficial y la resistencia al decapado. En este artículo se muestra que el empleo de materiales metálicos de alta compatibilidad es preferible y que siempre debe establecerse una correlación entre la calidad superficial y la resistencia al decapado mediante un simple valor numérico. La selección de materiales y los métodos de obtención de las superficies ingenieras, para las aplicaciones tribológicas, depende en gran medida del mecanismo y el tipo particular de desgaste predominante. Así, la selección de materiales resistentes al desgaste será analizado en función del tipo de desgaste.

Palabras clave: tribología, resistencia al desgaste, diseño, tratamiento superficial, decapado.

ABSTRACT: In this article, engineering surface application is introduced as a new concept. The basis of this concept is the understanding that different surface technologies are applied to design of existing engineering components but, it is necessary to know that surface engineering would cover only part of the design of the component, the surface treatment to be applied should also be known. This is because, surfaces with a high index of hardening due to deformation, are resistant to severe adhesive wear, abrasion and pickling, but they should not have the same resistance to other types of wear. It means that a correlation must be established between the surface quality and the pickling resistance. In this article, it is shown that the use of high compatibility metallic materials is preferred and that a correlation can be established between the surface quality and the pickling resistance by a simple number. The selection of materials and the methods of obtaining the engineering surfaces for tribological applications, depends to a large extent on the mechanism and particular type of predominant wear. Therefore, the selection of materials resistant to wear will be analyzed depending on the type of wear in question.

Keywords: Tribology, Wear Resistance, Design, Surface Treatment, Pickling.

INTRODUCCIÓN

Reconociendo que la gran mayoría de los componentes de ingeniería pueden degradarse o fallar catastróficamente, durante el servicio, debido a fenómenos relacionados con la superficie, tales como el desgaste, la corrosión o la fatiga, fue desarrollado a principio de los 80 el tópico de la ingeniería de superficies. El avance del mismo fue estimulado por el amplio rango de tecnologías superficiales: rayos de

láser y procesos de bombardeo electrónico, técnicas de plasma termo químicas, y novedosos recubrimientos ingenieros (tales como el eléctrico sin níquel), el implante iónico y, más recientemente, los métodos dúplex de modificación superficial. Sin embargo, los orígenes de la ingeniería de superficies deben encontrarse, fundamentalmente, en las tecnologías tradicionales de tratamientos térmicos superficiales, tales como el temple, la nitruración y la cementación.

*Author for correspondence: Francisco Martínez-Pérez, e-mail: fmartinezperez2013@gmail.com

Recibido: 12/03/2022

Aceptado: 14/09/2022

Un componente de ingeniería generalmente falla cuando su superficie no es capaz de resistir, adecuadamente, las fuerzas externas del medio a la que es sometida. La selección de un material superficial con propiedades eléctricas, térmicas, magnéticas y ópticas y la suficiente resistencia al desgaste, la corrosión y degradación es fundamental para su funcionalidad.

“La ingeniería de superficies incluye la aplicación de tecnologías tradicionales e innovativas a los componentes y materiales de ingeniería para obtener materiales compuestos con propiedades que no son obtenibles por la superficie de materiales normales”. Frecuentemente, las diferentes tecnologías de superficies son aplicadas en diseños de elementos de ingeniería, pero, idealmente, la superficie de ingeniería, no incluye ese diseño conociendo el tratamiento superficial a aplicar.

Esta innovativa y multidisciplinaria rama de la ingeniería, a través de un análisis tribológico del fenómeno del desgaste y de otros daños superficiales tales la corrosión y el empleo de la ciencia de materiales, permite optimizar las superficies expuestas en procesos externos tales como válvulas evaporadoras, intercambiadores de calor, bombas y compresores centrífugos, partes mecánicas y otros, para prolongar su vida útil.

Los tipos de desgaste más frecuentemente que se presentan en procesos industriales o de servicios son los siguientes:

- Abrasión
- Adhesión
- Corrosión por pitting
- Corrosión por fricción
- Cavitación por impacto.

Generalmente, tiene lugar una interacción de estos mecanismos así, en un sistema de succión pueden encontrarse mecanismos como erosión y cavitación, fatiga térmica y erosión en aspas de una turbina de vapor o abrasión y corrosión en una bomba de pulpa por tornillo que se ve afectada por la presencia de iones de cloro.

La corrosión es ella misma una interacción compleja de variables físico químicas, que siempre requiere de un análisis riguroso debido a las diferentes formas que ello tiene lugar, tales como la corrosión bajo tensión, aireación diferencial, vibro corrosión y otras.

Una vez que el especialista de ingeniería diagnostique los tipos y formas de desgaste presentes en el equipo o componente, debe emplear la ciencia de materiales para determinar qué aleación o recubrimiento emplear, ya sea metálico, polimérico, cerámico o de composición para prolongar la duración en servicio del componente. El ingeniero debe también determinar el procedimiento mediante el cual

deberá aplicarse la aleación, y su resistencia al tipo de desgaste presente.

DESARROLLO

La apropiada selección de materiales para la preparación de componentes para pares de fricción está frecuentemente limitada por factores que tienen poco que ver con la Tribología, tal como el costo de los mismos, por ejemplo. El peso es un factor que puede resultar importante y también la resistencia a la corrosión. Las propiedades mecánicas, la rigidez y la tenacidad son de gran importancia, también, en la aplicación ingeniera. Lo más conveniente será siempre la selección más integral, por lo que resulta conveniente el empleo de mapas de selección, tales como los de [Kostetskii \(1972\)](#); [Ashby y Jones, 2012](#); [Chowdhury, 2019](#) [1].

Sin embargo, muchas de las propiedades dadas, excepto quizás la resistencia a la corrosión, son propiedades del volumen del material y esto da la posibilidad de concentrar varias propiedades superficiales, de gran importancia en la tribología; a través de un espectro de diferentes métodos posibles de emplear. La modificación o recubrimiento superficial, en la posibilidad de brindar de combinar propiedades en la superficie y bajo la misma, esta última perteneciente al volumen del material, lleva a la llamada ingeniería de superficies.

El desgaste, como un adecuado factor de función de sistemas ingenieros, es obvio en el diseño. Sin embargo, el desgaste conlleva gastos mayores, que se emplean en el mantenimiento, debido al costo de remplazo de elementos, a la capacidad de producción, a la pérdida por la eficiencia energética y consecuentemente de las máquinas. Todo esto, de acuerdo con los profesores [Rabinowicz y Tanner \(1966\)](#); [Ron y Conway \(2002\)](#); [Ludema y Ajayi \(2018\)](#) [2] puede representar más de un 2% de PIB de un país.

Los diseñadores y mantenedores deben tener en cuenta dos consideraciones muy importantes; el establecer la magnitud del desgaste que tiene lugar en el servicio y ya conociendo esto, tomar las medidas necesarias para su reducción, tomando en cuenta, los aspectos económicos que esto implica. En orden de establecerla magnitud del desgaste, la cual puede ser calculada, debe ser conocido el mecanismo del desgaste, lo cual puede hacerse a través de la literatura especializada [3-5] [Hebda y Chichinadze \(1989\)](#); [Martínez \(2010\)](#); [Hutchings y Shipway \(2017\)](#), así como determinar los factores que afectan esto, lo cual puede hacerse a través de modelaciones físico matemáticas ([Stolarski, 1990](#); [Martínez, 2010](#)).

Los varios posibles procesos a aplicar deben considerarse parte esencial del diseño de los sistemas tribológicos. En la [Figura 1](#) se muestra un algoritmo que describe la secuencia de pasos a seguir en el diseño de un sistema tribológico.

Los metales y sus aleaciones son los materiales más frecuentemente para la construcción de elementos mecánicos. Sus composiciones y microestructuras son, en ocasiones, normalizadas, a veces, intencionalmente y por ello sus propiedades mecánicas son fáciles de predecir. Los materiales no metálicos se seleccionan con menor regularidad y por ello sus propiedades, aún con idéntica composición, tienden a variar. Sin embargo, en materiales, aun cuando las propiedades físicas y mecánicas sean iguales, su respuesta a las aplicaciones tribológicas no puede ser dada por un simple valor numérico.

La selección de materiales y los métodos de obtención de superficies ingenieras, para aplicaciones tribológicas, depende en gran medida del mecanismo y el tipo particular de desgaste. Así, la selección de materiales para resistir el desgaste será analizado en dependencia del tipo de desgaste en cuestión.

La variación en los parámetros operacionales de cualquier sistema tribológico estará limitada por los valores de dichos parámetros en la operación del sistema. Así, la disminución en las presiones actuantes durante la interacción de las superficies dependerá de la carga aplicada, pero esto, a su vez, dependerá de los factores de diseño. Sin embargo, la presión dependerá del área de contacto y esto, a su vez, dependerá de la calidad de las superficies de ambos elementos tribológicos. Las variaciones de la presión o en la velocidad pueden variar el mecanismo de contacto. Es por ello que, conociendo los valores de la magnitud del desgaste, es una etapa esencial en el diseño rediseño de pares de fricción.

Cuando el tipo de desgaste es la fricción (rozamiento), los parámetros de desplazamiento entre las superficies y las fuerzas actuantes, son esenciales a tomar en cuenta. Adicionalmente, el control al acceso de oxígeno como el medio ambiental, debe ser controlado. En un diseño óptimo para este tipo de sistema, en adición a los factores analizados, es necesario considerar la fuerza que actúa en la unión de ambos elementos para evitar el desplazamiento de uno con respecto al otro, la temperatura que puede generarse, la diferencia en la expansión térmica de ambos elementos del par y las probables fuentes de vibración.

Si tiene lugar el desplazamiento entre las superficies deslizantes, como en el caso de cojinetes, el desplazamiento en sí no puede ser limitado, ya que es algo intrínseco al par. En este caso es un factor fundamental es la tracción de las superficies que puede generar un elemento del par con respecto al otro. En este caso, el análisis debe ser hecho para decrecer la fuerza actuante en el par que genera el torque.

Si el mecanismo actuante de desgaste es la fatiga de contacto, como es el caso de los engranajes, los seguidores y los cojinetes, son esenciales tres factores, el número de ciclos de carga activos, los cuales no

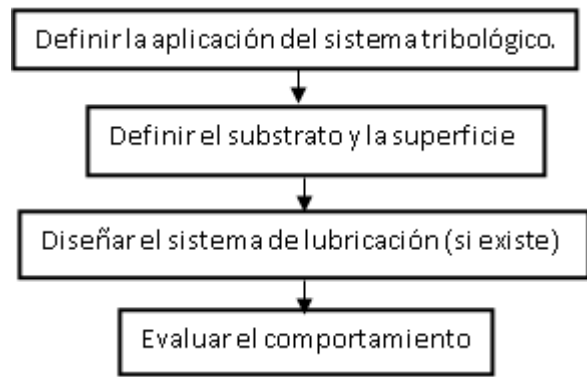


FIGURA 1. Algoritmo que muestra la secuencia de pasos para el diseño de un sistema tribológico.

pueden variarse y los esfuerzos de contacto, donde no solo hay que tener en cuenta su posible reducción, sino los valores de resistencia a ellos por los materiales del par, especialmente en el de más posible desgaste. Para la reducción de las fuerzas actuantes, los valores de la propia carga y la geometría de las superficies son esenciales.

Si el tipo de desgaste es abrasivo o erosivo, causado por partículas un parámetro a considerar será la de remoción de las partículas del sistema. Así, por ejemplo, es el caso de las partículas contaminantes en el lubricante. Aunque las partículas de mayor tamaño tienen un efecto mayor en ese desgaste que las pequeñas, la eliminación de estas partículas será de gran importancia, ya sea por el filtrado o por su separación por inercia. Sin embargo, la relación entre la dureza del material H_m y la dureza del abrasivo H_a debe exceder la relación de 0,85 ($H_m/H_a \geq 0,85$). En la erosión, parámetros fundamentales son la velocidad de impacto de las partículas sobre las superficies, el ángulo de incidencia de las mismas, así como la densidad del material impactado. En el desgaste hidroerosivo, el evitar ángulos agudos en la variación del movimiento del fluido es un aspecto a tener en cuenta.

La lubricación es un método poderoso para reducir la magnitud del desgaste en los cojinetes. Considerando K , una constante que representa un coeficiente de desgaste en el caso de deslizamiento lubricado, su valor puede ser considerablemente disminuido si las condiciones hidrodinámicas de lubricación se mantienen. Pero ellas no siempre pueden ser mantenidas, y cuando limitan la lubricación, el valor de K puede llegar a 10^{-6} dependiendo de las propiedades del lubricante empleado. K es una constante que en la ecuación de Archard para el desgaste por deslizamiento, es:

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

Siendo Q la magnitud del desgaste que depende del contacto entre las asperezas, P la presión de contacto que puede ser sustituido por la dureza del material que sufre el desgaste y W la carga normal aplicada. Valores aceptables de K de acuerdo con manuales de

Kostetskii (1972); Blau (1992); Hutchings y Shipway (2017); Chowdhury (2019) y Ron y Conway (2002) [6] se dan en la [Tabla 1](#).

TABLA 1. Valores límites del coeficiente K en el desgaste lubricado por deslizamiento

TIPO DE LUBRICACIÓN	K
Hidrodinámica	$< 10^{-13}$
Elastohidrodinámica	$10^{-13} - 10^{-9}$
Limite	$10^{-10} - 10^{-6}$
Lubricación sólida	$\approx 10^{-6}$
Sin lubricación (Desgaste severo)	$10^{-4} - 10^{-2}$

Es evidente que el desgaste por deslizamiento en condiciones de lubricación hidro dinámica, es el estado más deseable y en el diseño deben tomarse todas las medidas para que esté presente en condiciones de operación. El factor más importante que determina el régimen de lubricación es aquel en que se obtenga el mínimo espesor de película lubricante comparado con la rugosidad superficial., que puede ser calculada por nomogramas especializados, teniendo en cuenta el integrar el factor λ con la integración del resto de los parámetros (Hebda y Chichinadze, 1989; Stolarski, 1990; Ron y Conway, 2002; Martínez, 2010; 2017; Martínez, 2011) [4,8].

Para la evaluación de diferentes fórmulas acorde al tipo de desgaste, el algoritmo desarrollado puede ser consultado (Martínez, 2010). [4]

En general, el mayor valor de K tiene lugar en condiciones de deslizamiento metal-metal, menor que el que tiene lugar en condiciones de deslizamiento

metal-no metal y no metal-no metal. Si las condiciones son de deslizamiento metal-metal, con las mismas características, el valor de K es aún mayor. Si las condiciones son de deslizamiento de metales diferentes, el valor de K decrece y depende, esencialmente, de la compatibilidad tribológica de ambos metales; entendiéndose por contabilidad tribológica, la facilidad de que se establezca entre ambos metales altos valores del componente molecular de la fricción (Martínez, 2010) [4]. Esta posibilidad está fuertemente relacionada con la estructura cristalina y molecular de ambos metales del par, así como con el valor de su solubilidad en el estado sólido, el que se interfiere por su diagrama de equilibrio formado por la interacción de ambos metales. En la [Fig. 2](#) se muestra un mapa en el cual se puede apreciar la mutua solubilidad en pares de fricción, formados por dos metales puros.

Tanto las combinaciones que se indican como completamente insolubles, mostrando una solubilidad despreciable en el estado sólido (▲), como aquellas que se indican como fases coexistentes en el estado líquido (●), dan lugar a pares tribológicamente compatibles. Los pares de metales idénticos (○) son, por supuesto, completa y mutuamente solubles. Otros pares muestran diferentes relaciones de solubilidad, como se muestra en el mapa. En general, los pares por deslizamiento con alto grado de mutua solubilidad presentan baja compatibilidad tribológica y por tanto, valores de K relativamente altos; los de mutua baja solubilidad que llevan a una buena compatibilidad tribológica, tienden a obtener valores de K (Totten, 2016; Ludema y Ajayi, 2018).[9-10].

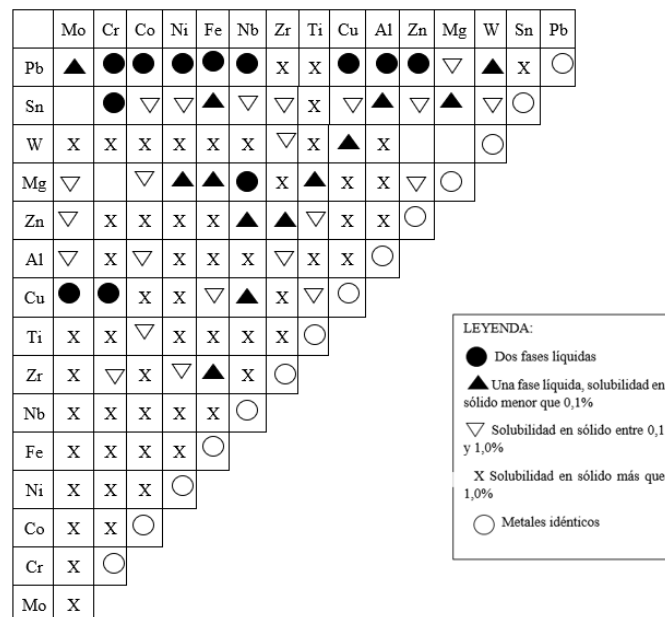


FIGURA 2. Mapa que muestra la mutua solubilidad relativa en metales puros de fricción, definidas por sus diagramas de fase relativos según Rabinowicz y Tanner (1966).

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

Algunos metales con una estructura hexagonal compactan muestran también un comportamiento anormal, asociado con su ductilidad limitada, comparado con los metales de estructura cúbica y también con factores químicos. El titanio, el zirconio y el hafnio, por ejemplo, muestran una relativamente baja reducción en los valores de K, cuando se lubrican con cualquier lubricante hidrocarbonado, comparado con el que ellos presentan cuando trabajan sin lubricación.

La dureza del acero y otros metales que forman óxidos durante el proceso de deslizamiento, es importante para determinar la estabilidad la estabilidad de la capa y por tanto el mecanismo de desgaste predominante. Si el metal es lo suficientemente duro para proporcionar el suficiente soporte mecánico para soportar la capa de óxido, tendrá lugar un desgaste medio con valores de K bajos a través del mecanismo oxidante. Así, la dureza puede tener una influencia en la resistencia al desgaste adhesivo de algunos metales, pero también al incremento en la dureza en una partícula de una aleación puede provocar un decremento en el valor de su desgaste; la dureza no debe servir como factor de predicción de la resistencia al desgaste de diferentes aleaciones. Otros factores, especialmente la presencia de componentes micro estructurales tales como carburos en los aceros y el grafito en las fundiciones son, en ocasiones, de gran importancia (Martínez, 2010; 2017) [4-11].

La resistencia de los metales a condiciones severas de desgaste adhesivo y al daño superficial bajo cargas normalmente altas, no puede siempre correlacionarse con su resistencia al desgaste bajo condiciones menos severas. Varios factores influyen en la resistencia de los materiales al daño superficial por deslizamiento: la efectividad de la capa superficial a preservar la adhesión, la resistencia a la adhesión una vez que la película de óxido se rompe y la permanencia del enlace formado. La solubilidad mutua como indicador de la fortaleza de la fuerza adhesiva, juega algún rol; los metales que se unen fuertemente son más susceptibles al daño superficial por deslizamiento. Los metales hexagonales con un número limitado de planos de deslizamiento tienen una baja tendencia a este tipo de daño que los metales con estructura cúbica, presumiblemente debido a su menor ductilidad.

Algunas investigaciones han demostrado que metales y aleaciones con un alto grado de dureza

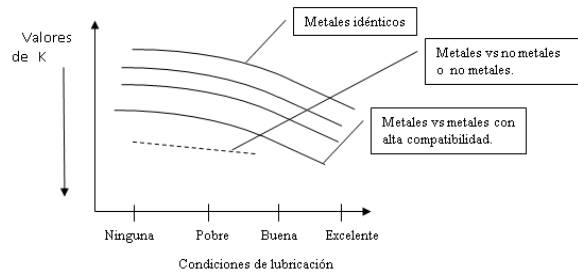


FIGURA 3. Valores típicos de coeficientes de desgaste K de diferentes materiales en pares por deslizamiento bajo diversas condiciones de lubricación.

deformacional, presentan una menor tendencia al daño superficial durante el deslizamiento; sin embargo, este factor no es infalible en el pronóstico. Por ejemplo, los aceros austeníticos que también presentan alto endurecimiento deformacional, muestran alto daño superficial en este tipo de proceso, cuando tiene lugar una transformación martensítica. La dureza solamente es un pobre indicador de la resistencia al daño superficial durante el proceso de deslizamiento en 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 una baja concentración de esa dureza y con partículas frágiles.

La Fig. 3 muestra un diagrama comparativo de valores típicos de coeficientes de desgaste K de diferentes materiales en condiciones de deslizamiento bajo diversas formas de lubricación.

Las deposiciones de capas por difusión, las cuales tienen una baja ductilidad, presentan una buena resistencia a este tipo de proceso. Las superficies rugosas, preferiblemente aquellas de estructura variable. (por ejemplo, aquellas generadas por bombardeo con arena), generalmente incrementan la resistencia al daño, probablemente debido a que el crecimiento de la unión en este proceso, es limitada; mayor probablemente al daño.

Los materiales cerámicos sometidos a deslizamiento moderado muestran coeficientes de desgaste tan bajos o aun menores a los de diversos metales. Este hecho unido a su alta dureza, muestra que los materiales cerámicos pueden presentar valores significativamente más bajos que los metales. Sin embargo, el uso volumétrico de los materiales cerámicos presenta algunas limitaciones en las aplicaciones tribológicas. Sus propiedades mecánicas (especialmente su tenacidad a la fractura) puede no ser adecuadas para requerimientos que son necesarios tales como su producción en formas apropiadas (las cuales pueden realizarse por metalurgia de polvos, generalmente con un costo elevado) y también la posibilidad de fractura superficial a escalas pequeñas pero lo cual conlleva un

desgaste severo, todo lo cual requiere gran cuidado en el diseño. Sin embargo, los componentes integralmente cerámicos pueden resultar muy durables en los procesos tribológicos; por ejemplo, los bujes de aluminio y los sellos en las bombas de agua, los componentes de válvulas de nitruro de silicio y los extremos femorales de alúmina, así como elementos en los implantes de cadera.

Algunas de las desventajas del empleo volumétrico de los materiales cerámicos en elementos de pares de fricción, pueden ser evitadas empleando el material en forma de depósito en un sustrato metálico o por depósitos cerámicos proyectados por polvo en forma de plasma o por depósitos físicos al vacío (PVD) o químico al vacío (CVD), los cuales son métodos que conforman un grupo importante de ingenierías superficiales. En todos los usos tribológicos de los materiales cerámicos, es muy conveniente el empleo de la lubricación ya que reduce la tracción superficial y por tanto la fractura local que tiende al desgaste severo. Sin embargo, la posible reacción química del lubricante con la superficie debe ser tenida en cuenta.

El empleo de materiales poliméricos es poco para su empleo como materiales resistentes al desgaste, siendo comúnmente empleados como cojinetes de deslizamiento, a veces en condiciones de deslizamiento seco o límite. Sin embargo, algunos materiales poliméricos, con suficiente resistencia, pueden ser empleados como elementos volumétricos en las aplicaciones tribológicas, siendo significativo el uso del nylon (poliamidas), los sulfuros de poliéster; además estos materiales la mayoría de las veces, son empleados como composites base polimérica, fortalecidos con fibras adecuadas. Estos materiales son empleados en engranajes de baja carga y también los polímeros reforzados con fibras de carbón se emplean en algunos engranajes en carros de carrera, en donde se combina el bajo peso con buenas propiedades tribológicas en comparación con elementos similares de acero forjado.

La amplia diversidad de la existencia de materiales superficiales ingenieros, permite a los diseñadores, al menos en una cierta extensión, emplearlos en vez de materiales iguales volumétricamente en la superficie.

La Fig. 4 muestra el amplio rango de combinación de capas profundas y de dureza que pueden obtenerse superficialmente por estos métodos.

De la Fig. 4 puede concluirse que los diferentes métodos brindan oportunidades diversas de combinación de profundidades y durezas en las capas superficiales. Puede señalarse que algunos métodos se desconocen, tales como el niquelado químico, el plateado con níquel, el plateado con cromo y otros. Tales métodos, así como las deposiciones superficiales con PVD, CVD o los implantes iónicos que producen capas muy finas y de gran dureza, son útiles para el empleo en aplicaciones con mínima extensión de desgaste y donde la fuerza superficial actuante

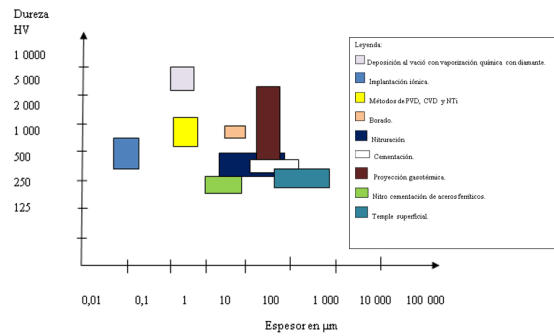


FIGURA 4. Profundidades y durezas típicas de diferentes formas de deposiciones y superficies ingenieras.

decrezca rápidamente en el trabajo, para que la fina capa superficial no sea eliminada. Esto está asociado con el hecho que la etapa de interacción elástica sea alcanzada rápidamente en las aplicaciones tales en que como elementos de precisión ingeniera como son las terrajas, las brocas y algunos elementos de corte en molino; métodos que pueden brindar gran beneficio en el trabajo, fundamentalmente el recubrimiento al vacío con NiTi y la aplicación con carburos cementados, manufacturado por metalurgia de polvos, los cuales pueden aumentar significativamente la vida superficial en elemento de corte.

En otros casos donde la fuerza de contacto penetre en la profundidad superficial del elemento hacia el total de la capa superficial y más allá (gradientes negativos), se necesitan métodos que generen capas más gruesas. En engranajes altamente cargados, por ejemplo, el material en la capa superficial debe tener una alta resistencia elástica, para mantener las condiciones de interacción elástica durante el trabajo, la cual está expuesta a altas fuerzas de contacto cuando ocurre contacto por deslizamiento. Sin embargo, el núcleo del diente del engranaje, así como el resto de éste, requiere de alta tenacidad de fractura y de resistencia a la aparición de grietas de fatiga, ya que está sometido a cargas cíclicas altas y, a veces, a cargas de impacto, durante el servicio. En este caso, la combinación de tales propiedades, es preferible el empleo de materiales metálicos con tratamientos térmicos y químicos superficiales.

CONCLUSIONES

- Frecuentemente, las diferentes tecnologías superficiales son aplicadas a diseños de componentes ingenieros existentes, pero, idealmente, las superficies ingenieras cubrirán el diseño de esos componentes conociendo el tratamiento superficial a ser aplicado.
- No existe una correlación general entre el valor del desgaste y el coeficiente de fricción, aunque la lubricación esté presente como tercer cuerpo o que el constituyente de uno de los elementos del par

(por ejemplo, grafito en el hierro fundido o el sulfuro de molibdeno en composites base nylon) tienda a reducir ambos valores del desgaste y la fricción. Aun la pobre lubricación es mejor que una que tienda a reducir el valor del desgaste.

- El empleo de materiales idénticos en el desgaste por deslizamiento debe ser evitado. El uso de materiales metálicos de alta compatibilidad es preferible lo cual significa que ellos presentan pequeña o no solubilidad en el estado sólido en su diagrama de equilibrio.
- La alta dureza superficial es conveniente en muchos casos, donde puedan emplearse diferentes métodos de ingeniería superficial tales como PVD, CVD o tratamientos térmicos o químico térmicos superficiales.
- En aceros es conveniente en la capa externa, la presencia de carburos o nitruros, aun cuando se reduzca algo la dureza superficial.
- Las superficies con un alto índice de dureza causado por deformación, son resistentes al desgaste adhesivo severo y la resistencia al desprendimiento. Puede establecerse una correlación entre la calidad superficial y la resistencia al desprendimiento. Las superficies rugosas generadas por bombardeo superficial son más resistentes al desprendimiento.
- En el desgaste erosivo son factores importantes la densidad del material impactado, la velocidad del impacto y el ángulo de incidencia de la colisión.
- Las capas superficiales creadas por métodos PVD, CVD, implantación iónica, nitruración o cementación son resistentes al desgaste adhesivo. La elevada dureza y la baja ductilidad son beneficiosas en estos casos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHBY, M.F.; JONES, R.H.D.: *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*, Ed. Elsevier Science, Second Edition ed., vol. 1, United Kingdom, Department of Engineering, University of Cambridge, Elsevier Science, United Kingdom, 2012, ISBN: 0-08-096665-9.
- BLAU, P.J.: "Friction, lubrication, and wear technology", *ASM International*, : 175-235, 1992.
- CHOWDHURY, M.A.: *Friction, Lubrication and Wear*, Ed. BoD-Books on Demand, 2019, ISBN: 1-78984-287-5.
- HEBDA, H.; CHICHINADZE, A.: *Manual de Tribotecnia*, Ed. Mashinoostroenie, vol. Volume 1, Moscow, Rusia, publicado en idioma ruso, 1989.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P.: *Tribology: friction and wear of engineering materials*, Ed. Butterworth-Heinemann, United Kingdom, University of Cambridge, Department of Materials science and Metallurgy, 2017, ISBN: 0-08-100951-8.
- KOSTETSKII, B.I.: *Friction, Lubrication and Wear in Machinery*, Inst. Army Foreign Science and Technology Center, Charlottesville Va, 1972.
- LUDEMA, K.C.; AJAYI, O.O.: *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*, Ed. CRC press, 2018, ISBN: 0-429-44471-0.
- MARTÍNEZ, F.: *Tribología Integral*, Ed. Editorial Noriega, México, DF, 2010, ISBN: 978-607-05-0271-2.
- MARTINEZ, P.F.: *Tribología integral*, Ed. Ed. Limusa, México, DF, 2011.
- MARTÍNEZ, P.F.: *Mantenimiento Industrial. Conceptos y aplicaciones*, Ed. Editorial Cuba Azúcar, La Habana, Cuba, 2017, ISBN: 959-261-526-8.
- RABINOWICZ, E.; TANNER, R.I.: "Friction and wear of materials", *Journal of Applied Mechanics*, 33(2): 479, John Wiley, 1966.
- RON, R.; CONWAY, J.J.M.: *Friction and Wear of Sliding Bearings*, Ed. Glacier Vandervills Inc, vol. ASM Handbook, USA, 2002.
- STOLARSKI, T.: *Tribology in machine design*, Ed. Industrial Press Inc., USA, 1990, ISBN: 0-8311-1102-X.
- TOTTEN, G.: *Surface Modifications and Mechanisms*, Ed. Marcel Dekker Inc, New York, USA, 2016, ISBN: 0-8247-4872-7.

Francisco Martínez-Pérez, Profesor Titular, Universidad Tecnológica de La Habana, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao La Habana, Cuba, Tel. 78 335577, e-mail: fmartinezperez2013@gmail.com.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.