

## Ingeniería de superficies y su impacto medioambiental\*

A. Agüero\*\*

### Resumen

La ingeniería de superficies consiste en la modificación de la microestructura y/o la composición superficial de un componente mediante métodos mecánicos, físicos o químicos, que pueden implicar el aporte de otro material para cambiar las propiedades superficiales del mencionado componente. Una de sus consecuencias más importantes es que permite alargar significativamente, la vida útil de todo tipo de componentes empleados en un gran número de aplicaciones industriales. Por otra parte, contribuye al ahorro energético por permitir el aumento de las temperaturas de combustión consiguiendo una mayor eficiencia, por contribuir a la reducción de peso y por colaborar de forma significativa a disminuir la fricción entre componentes. En el presente trabajo se introduce la ingeniería de superficies, sus diferentes modalidades, algunos ejemplos de sus aplicaciones industriales y las interacciones, positivas y negativas, con el medio ambiente.

### Palabras clave

Modificación superficial. Impacto medioambiental. Recubrimientos. Aplicaciones industriales.

## Surface engineering and environmental issues

### Abstract

Surface engineering addresses the modification of the microstructure and/or composition of the surface of components by mechanical, physical or chemical methods that may imply adding a material in order to change the surface properties of said component. One of its most important consequences is the significant increase of the useful life of a variety of components in a large number of industrial applications. Moreover, it contributes to energy savings by increasing efficiencies as it allows higher combustion temperatures, by allowing the use of lighter components and by significant friction reduction. In this paper, surface engineering is introduced, as well as its different modalities, examples of industrial applications and positive and negative environmental impacts.

### Keywords

Surface modification. Environmental impact. Coatings. Industrial applications.

## 1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería de superficies consiste en la modificación de la microestructura y/o la composición de la superficie de un componente, mediante métodos físicos o químicos que pueden implicar el aporte de otro material para cambiar las propiedades superficiales del mencionado componente. En cierta forma, la ingeniería de superficies imita a la naturaleza que confiere a los seres vivos una piel para protegerlos de las

agresiones del medio. Los objetivos de la ingeniería de superficies pueden resumirse como sigue:

- Incrementar la vida de un componente. La vida de un componente se puede alargar aumentando su resistencia frente a factores externos inherentes a su aplicación. Estos factores son, entre otros: a) el desgaste de material debido a la abrasión resultante de la fricción entre dos superficies en movimiento relativo o a la erosión por el impacto con partículas; b) el ata-

\* Trabajo recibido el día 29 de junio de 2006 y aceptado en su forma final el día 26 de octubre de 2006.

\*\* Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Área de Materiales Metálicos; Ctra. Ajalvir Km. 4, Torrejón de Ardoz, Madrid, España.

- que químico que puede ocurrir a cualquier temperatura y puede provenir de medios gaseosos y líquidos (acuoso o fundido); y c) las altas temperaturas, ya que ciertos recubrimientos se comportan como aislantes térmicos, protegiendo a componentes que de no ser así no podrían soportar las altas temperaturas requeridas por la aplicación correspondiente.
- Cambiar el aspecto de un componente (cosmética). Un gran número de recubrimientos tiene colores atractivos y suelen emplearse sobre vidrios arquitectónicos y en joyería para reemplazar a los metales preciosos como el oro.
  - Modificar las propiedades ópticas de un componente. Ciertos recubrimientos pueden ser empleados como filtros contra radiación indeseada, como por ejemplo para gafas, cabinas de pilotos en aeronaves, etc. Por otra parte, hay ciertos materiales (en capa) que por sus emisividades y reflectividades pueden emplearse para control térmico, por ejemplo, en satélites.
  - Actuar como barrera frente al paso de especies indeseadas. En el empaquetado de alimentos se emplean capas de ciertos materiales para impedir el paso del oxígeno y la humedad que conducirían a una degradación más rápida de estos últimos. Otra función es la de actuar como barreras de difusión impidiendo o retardando el paso de especies entre un recubrimiento y el sustrato.

- Estimular procesos deseados. Dos ejemplos típicos de esta aplicación son, por una parte, los recubrimientos de hidroxiapatita (carbonato de calcio) sobre implantes óseos para acelerar la regeneración del tejido óseo en implantes dentales, de cadera, rodilla, etc., y, por otra parte, los recubrimientos de  $\text{TiO}_2$  sobre techados como catalizadores para la descomposición de compuestos orgánicos contaminantes presentes en la atmósfera mediante radiación ultravioleta.

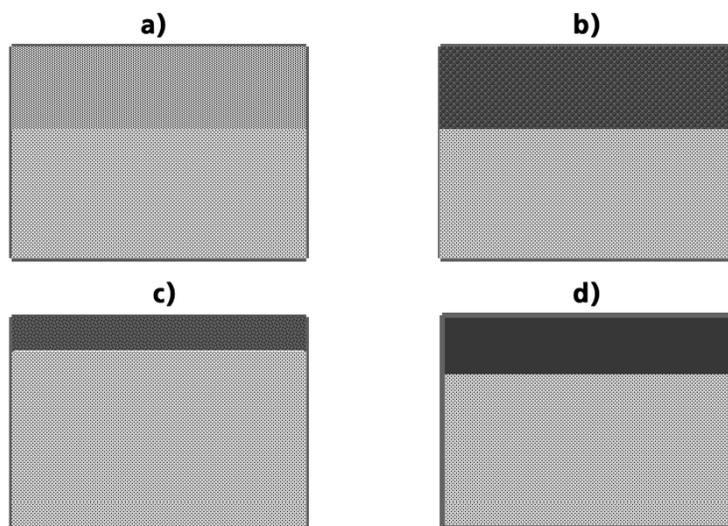
En los próximos párrafos se procederá a describir brevemente la ingeniería de superficies y las diferentes tecnologías empleadas para modificar superficies así como algunos ejemplos de aplicaciones industriales y, por último, se describirá el impacto medioambiental de la ingeniería de superficies.

## 2. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

### 2.1. Tipos de tratamientos superficiales

Las modificaciones superficiales que conlleva la ingeniería de superficies pueden clasificarse como sigue (Fig. 1):

- Transformación estructural sin aporte de material. Mediante tratamientos mecánicos o térmicos, se modifica la microestructura y/o la morfología de la superficie del material. Por ejemplo, mediante granallado con partículas



**Figura 1.** Técnicas de modificación superficial empleadas en la ingeniería de superficies: a) Transformación estructural sin aporte de material; b) Interdifusión entre un material aportado y el sustrato; c) Tratamientos por conversión química; y d) Aporte de una capa de otro(s) material(es).

*Figure 1. Surface modification technique employed in surface engineering: a) Structural transformation without adding material; b) Interdiffusion between the substrate and the added material; c) chemical conversion treatments; and d) deposition of a layer or layers of other material(s).*

**Tabla I.** Principales Procesos de Deposición de Recubrimientos

*Table I. Principal Coating Deposition Processes*

Vía	Proceso	Material depositado
Acuosa	Electro-deposición <i>Electroless</i>	Ni, Cu, Cr, Cd, Zn, Ag, Pt, Aleaciones Ni (Ni-P, Ni-B)
Inmersión en metal fundido	Galvanizado <i>Hot Dip</i>	Zn, Zn-Al Sn, Al, Sn, Pb, Pb-Sn
Gaseosa	PVD, CVD	Óxidos, nitruros, carburos, metales
Sólida	Proyección Térmica (llama, arco, plasma, alta velocidad y detonación) Láser Soldadura	Metales Cerámicos Refractarios Polímeros Materiales compuestos
Suspensiones	Rociado Inmersión Electroforesis Brocha	

esféricas de metal o de vidrio se puede aumentar la dureza de un material y en consecuencia su resistencia al desgaste<sup>[1]</sup>. Dentro de los tratamientos térmicos se encuentran el soplete, el bombardeo con haz de electrones, la inducción electromagnética<sup>[2]</sup> y la irradiación con láser<sup>[3 y 4]</sup>. Dependiendo del sustrato tratado, estos tratamientos pueden aumentar la resistencia a la corrosión atmosférica además de la resistencia al desgaste.

- Interdifusión con otro(s) elemento(s). Poniendo en contacto precursores sólidos, líquidos o gaseosos con la pieza a recubrir se puede lograr la interdifusión de uno o varios elementos con el material del sustrato mediante calentamiento. De esta forma, se puede carburizar, nitrurar, carbonitrurar o boronizar<sup>[5]</sup> para endurecer, por ejemplo, aceros. Por otra parte, también se puede aluminizar, siliconizar o cromizar<sup>[6]</sup> para aumentar la resistencia a la corrosión a alta temperatura. El espesor de los tratamientos por difusión puede alcanzar de 20 a 1.500  $\mu\text{m}$ . La implantación iónica podría considerarse como un caso particular de los tratamientos por difusión<sup>[7]</sup>. Consiste en el bombardeo a energías muy altas con iones del elemento que se quiere aportar y que “penetran” al sustrato. Alcanza espesores muy pequeños ( $< 1 \mu\text{m}$ ) en concentraciones, también, muy pequeñas. Prácticamente, todos los elementos pueden ser implantados. La implantación iónica puede aumentar la resistencia al desgaste y a la corrosión.

- Tratamientos por conversión química. Mediante estos tratamientos se consigue la oxidación del material del sustrato, con o sin aporte de otros elementos<sup>[8]</sup>. Por ejemplo, el anodizado consiste en oxidar la superficie de las aleaciones de aluminio o titanio mediante un proceso electroquímico para pasivarlas<sup>[9]</sup>. El cromatado y el fosfatado resultan en la formación de óxidos protectores que también se emplean como imprimación para después aplicar pinturas protectoras.

- Aporte de una capa de otro(s) material(es). Mediante una serie de procesos físicos o químicos, es posible aportar todo tipo de materiales sobre un sustrato. Son muchas las técnicas posibles y pueden realizarse en medio acuoso, orgánico, de metales fundidos y gaseoso. La tabla I ilustra las principales técnicas de deposición.

La electrodeposición<sup>[10]</sup> consiste en un proceso electroquímico en el cual se hace pasar corriente entre dos electrodos a través de un electrolito que contiene cationes del metal o metales a depositar y la pieza a recubrir se comporta como cátodo. Un ejemplo muy utilizado es la deposición de cromo duro, empleado en numerosas aplicaciones en la industria metal-mecánica, energética y aeronáutica como recubrimiento antidesgaste.

La deposición por *electroless*<sup>[11]</sup> es también un proceso electroquímico pero que no requiere electrodos ya que la superficie de las piezas a recubrir se activa para que catalice la deposición de un metal mediante una reacción electroquímica. Se usa principalmente

te para depositar Ni-P o Ni-B como recubrimiento antidesgaste.

La inmersión en metal fundido o *hot dip*<sup>[12 y 13]</sup> consiste, como su nombre lo indica, en la inmersión de la pieza a recubrir en el metal o aleación fundida. Se emplea para depositar zinc (galvanizado) o ZnAl, Al, AlSi, etc. Estos recubrimientos se emplean principalmente para la protección contra la corrosión medioambiental.

PVD y CVD son términos ingleses que vienen de *Physical y Chemical Vapour Deposition*, respectivamente, y que se refieren a la deposición en fase gaseosa mediante procesos físicos o químicos, esencialmente. La técnica PVD<sup>[14]</sup> implica la evaporación, por algún medio físico, del material a recubrir en atmósfera reducida inerte para depositar el mismo material, o reactiva (por ejemplo N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, etc.) para depositar un compuesto del material evaporado (nitruro, óxido, etc.). Un ejemplo típico es la producción de TiN para reducir el desgaste de las herramientas de corte y conformado. La técnica CVD, por su parte, consiste bien en la descomposición térmica de una especie gaseosa o bien en la reacción de dos especies, en ambos casos, sobre la superficie de la pieza a recubrir, resultando en un depósito sólido y en compuestos volátiles<sup>[15]</sup>. La deposición de aluminio por CVD (AlCl<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>) sobre componentes de turbinas aeronáuticas y de generación eléctrica se emplea como protección contra la oxidación y la corrosión a alta temperatura.

Mediante la proyección térmica se impulsan partículas micrométricas del recubrimiento mediante un gas portador y se llevan a la temperatura necesaria para que fundan<sup>[16]</sup>. Al chocar contra la superficie de la pieza, dichas partículas se aplastan y aglomeran formando un recubrimiento. Existen varios tipos entre los que se incluye la proyección térmica por llama, arco eléctrico, plasma, alta velocidad oxicomcombustible y detonación. Esta es una técnica muy versátil ya que se puede depositar cualquier tipo de material sobre, prácticamente, cualquier tipo de sustrato. Tiene una gran variedad de aplicaciones en todo tipo de industrias como pueden ser la aeronáutica, textil, automovilística, metal-mecánica, etc.

La deposición de recubrimientos mediante láser es relativamente nueva y objeto de cada vez más aceptación por parte de la industria. El láser se emplea para fundir un material aportado en forma de polvo, barra o alambre sobre la superficie del componente que se desea recubrir<sup>[17 y 18]</sup>. Se obtienen recubrimientos de muy buena calidad y adherencia con el sustrato de cualquier material.

También se puede aportar una capa de recubrimiento mediante soldadura por chispa, empleando un electrodo del material que se aplica como recubrimiento. La principal aplicación de esta técnica es el aumento de la resistencia al desgaste aplicando ma-

teriales muy duros, por ejemplo, la estellita (aleación a base de cobalto)<sup>[19]</sup>.

La aplicación de pinturas es una de las técnicas de deposición de recubrimientos más antiguas. No sólo tienen una función estética sino también protectora (frente a la corrosión), militar (camuflaje), anti-incrustante en la industria náutica (frente a la fijación de crustáceos y algas en los cascos de barcos), etc. Las pinturas son suspensiones de pigmentos orgánicos o inorgánicos en aglutinantes y solventes que se aplican mediante rociado, brocha, electro-pintado, etc.<sup>[20]</sup>. Un caso particular de las pinturas son aquellas en las que el pigmento está constituido por partículas metálicas y que se conocen como *slurries*<sup>[21]</sup>. Se emplean en la industria aeronáutica y química para protección contra la oxidación y corrosión medioambiental y a alta temperatura.

## 2.2. Criterios de selección de tratamientos superficiales

En la actualidad, el principal criterio que se toma en cuenta a la hora de decidir si se va a aplicar o no un tratamiento superficial es el económico, es decir, si el reemplazar un componente tiene un coste más elevado que el de aplicar el tratamiento que se requiera.

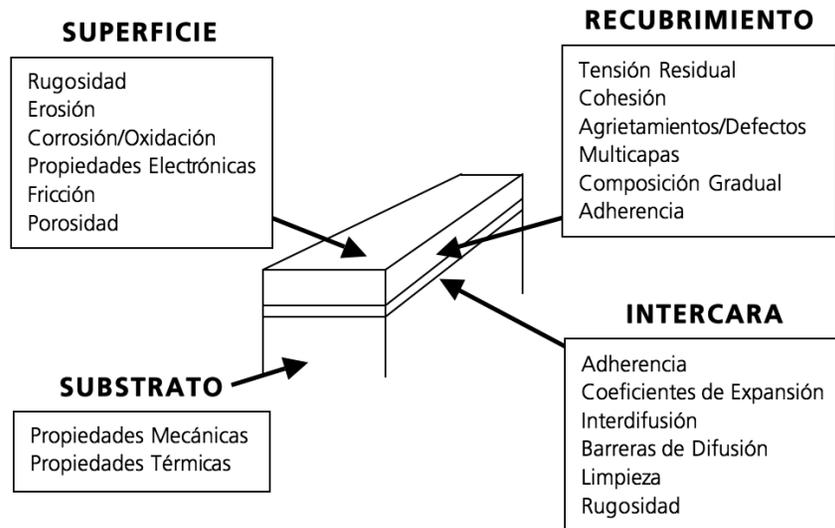
Los factores a evaluar son:

- el coste añadido
- el incremento de la vida útil del componente
- la disminución de la frecuencia del tiempo de parada (cuando hay que cambiar componentes)
- el incremento en la calidad del producto final.

Por otra parte, para estimar el coste del proceso hay que tener en cuenta:

- que el proceso de deposición o tratamiento debe de permitir recubrir todo el componente (tamaño y geometría)
- que en ocasiones será necesario rediseñar o cambiar las especificaciones del componente para poder aplicar un recubrimiento, lo cual implica un coste añadido
- y que el tratamiento o proceso no debe comprometer las propiedades del sustrato.

Si el tratamiento elegido implica aporte de material o recubrimiento (tipo b, c o d, descritos en el apartado anterior), al seleccionarlo y diseñarlo para una aplicación específica, hay que tener en cuenta las características y propiedades de cada una de los cuatro “elementos” que constituyen un sistema sustrato-recubrimiento (Fig. 2) y que deben ponderarse de acuerdo con la aplicación específica. Algunas de estas propiedades también se emplean como parámetros de control de calidad. La denominación “ingeniería de superficies” resulta de la complejidad de estos sistemas.



**Figura 2.** Algunas propiedades estudiadas en la ingeniería de superficies.

*Figure 2.* Some properties studied in surface engineering.

### 3. APLICACIONES INDUSTRIALES

Las aplicaciones industriales de la ingeniería de superficies son muchas y muy diversas. En este párrafo se describen, brevemente, algunas de las más representativas.

#### 3.1. Recubrimientos contra la oxidación y la corrosión en turbinas aeronáuticas y de generación eléctrica<sup>[22]</sup>

Las turbinas de gas para generación eléctrica o propulsión aeronáutica constan esencialmente de un compresor en el que el aire es llevado a altas presiones y una zona de alta temperatura en la que ocurre una combustión que al provocar expansión provoca movimiento. En las primeras, que son de gran tamaño (Fig. 3), se emplea dicho movimiento para la generación de energía eléctrica mientras que en las segundas, de menor tamaño, se emplean para propulsión.

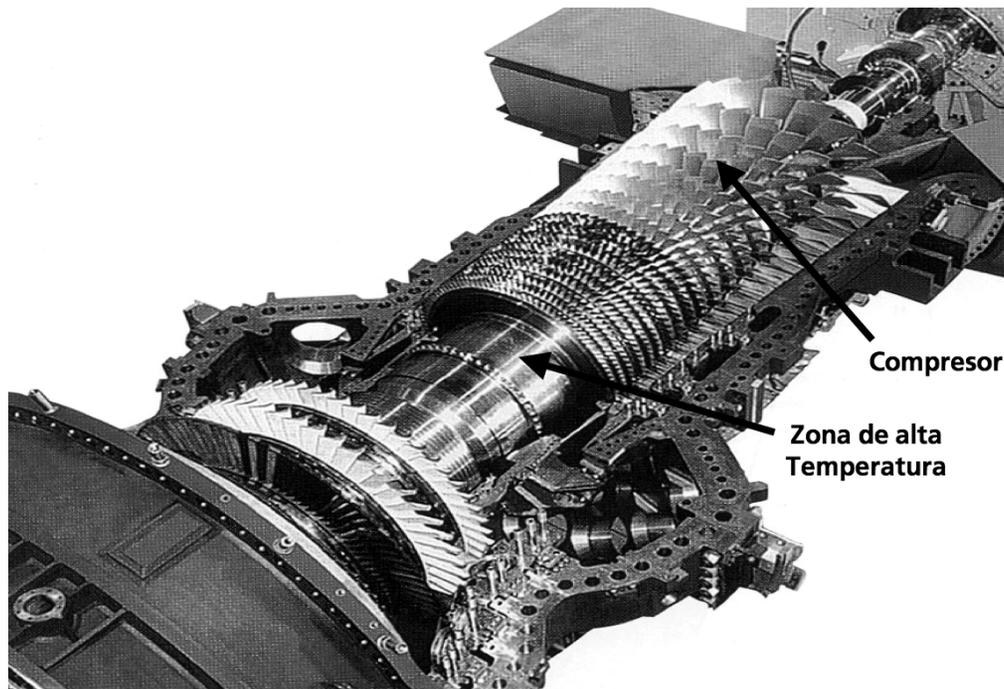
Los componentes de las zonas que operan a elevadas temperaturas están hechos de superaleaciones, que son materiales, generalmente, a base de cobalto o níquel, desarrollados para soportarlas en condiciones en que las tensiones mecánicas son relativamente altas y en las que se requiere una alta estabilidad superficial. Sin embargo, durante la década de 1950, se hizo evidente que las composiciones que aumentaban la resistencia mecánica de estos materiales y aquellas que ofrecían una óptima protección contra el medio ambiente, no eran compatibles. Esto condujo a la idea de emplear recubrimientos protectores sobre materiales con alta

resistencia mecánica y pobre estabilidad superficial. Sin recubrimientos, las superaleaciones de cobalto o níquel actualmente empleadas sufren oxidación o corrosión por sales fundidas. La figura 4 muestra los efectos de la oxidación sobre un álabe de turbina mostrando una importante y catastrófica pérdida de material por desprendimiento de óxidos no protectores.

Un sistema protectivo de recubrimientos para álabes consta de dos capas: una metálica, intermedia cuya función es ofrecer protección contra la oxidación y la corrosión y que además sirve de anclaje para la segunda, constituida por un material cerámico, poroso y aislante térmico (Fig. 5). La finalidad de esta segunda capa, denominada barrera térmica, es la de mantener una menor temperatura sobre la superficie del álabe internamente refrigerado. De esta forma, se puede elevar la temperatura de trabajo para obtener mayores eficiencias energéticas sin comprometer la resistencia mecánica de los álabes.

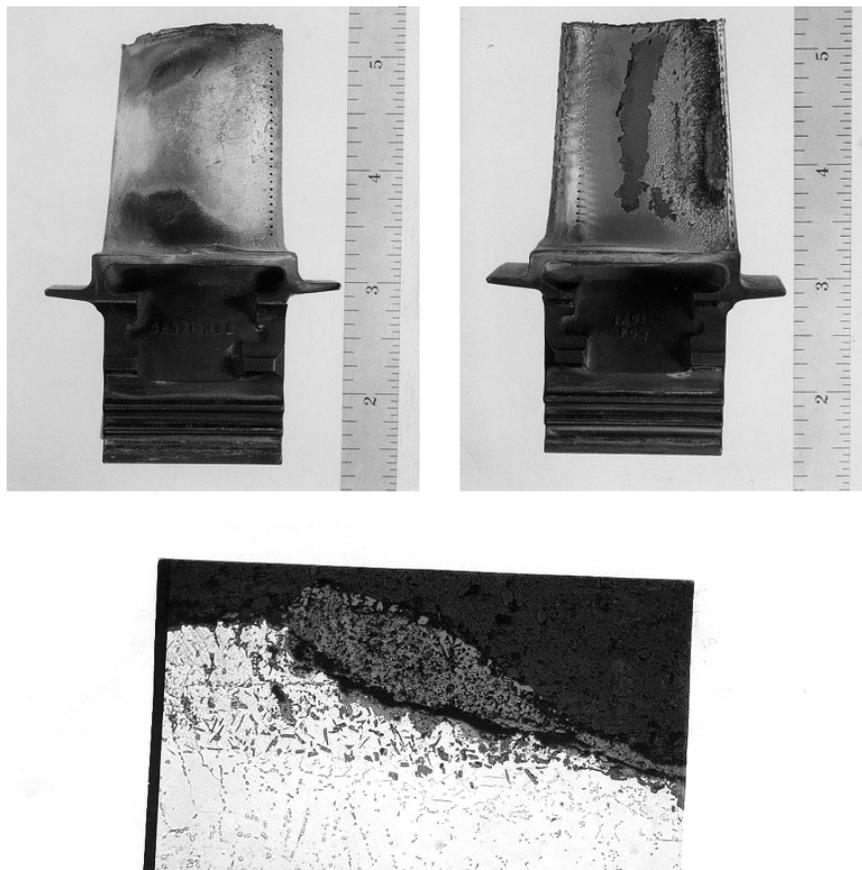
#### 3.2. Implantes óseos<sup>[23 y 24]</sup>

Los implantes dentales y de articulaciones (Fig. 6) están hechos de materiales metálicos tales como aleaciones a base de titanio sobre las que se deposita un recubrimiento anti-desgaste, como TiN, mediante CVD o PVD. Sobre este recubrimiento, a su vez, se deposita mediante proyección térmica por plasma, una capa de hidroxiapatita, un carbonato de calcio de estructura similar a la ósea, que estimula el crecimiento óseo para una mejor y más rápida fijación del correspondiente implante, es biocompatible y posee gran estabilidad a largo plazo.



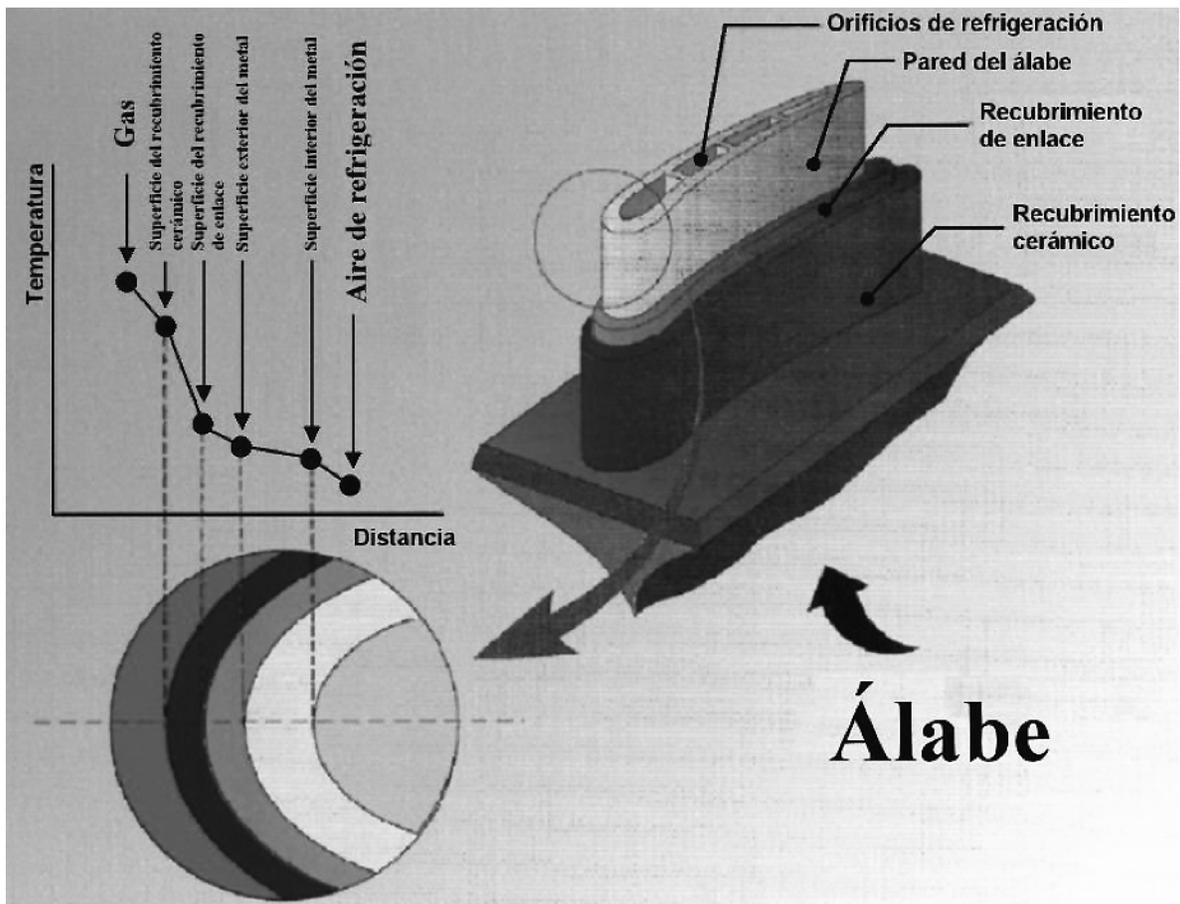
**Figura 3.** Turbina de gas para generación eléctrica.

*Figure 3. Power generation gas turbina.*



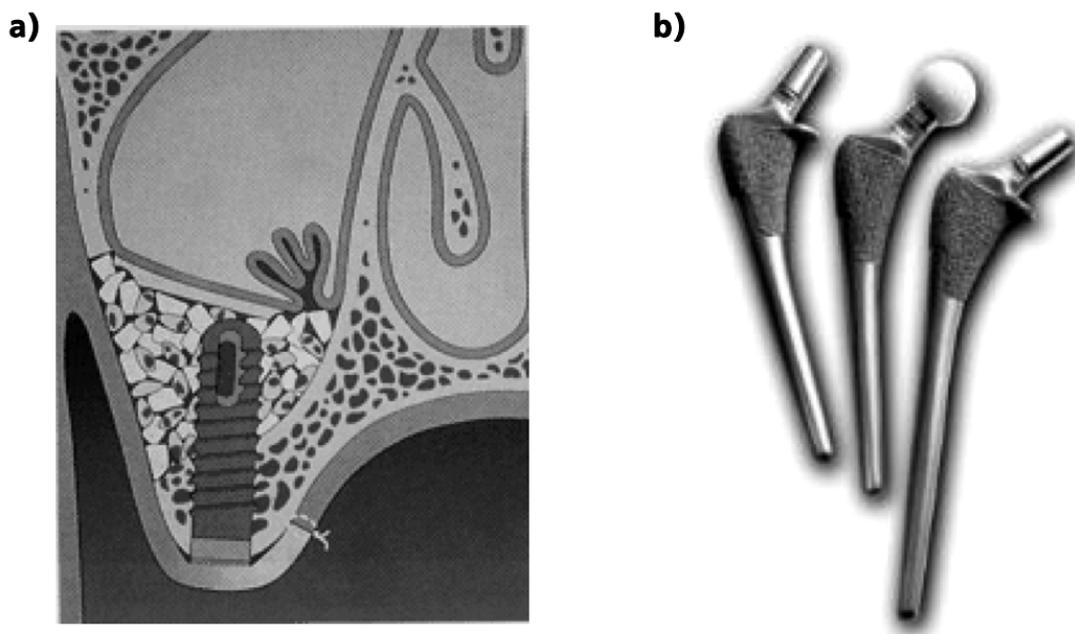
**Figura 4.** Ábabe de turbina de generación eléctrica sometido a oxidación a alta temperatura.

*Figure 4. Power generation turbine blade subjected to high temperature oxidation.*



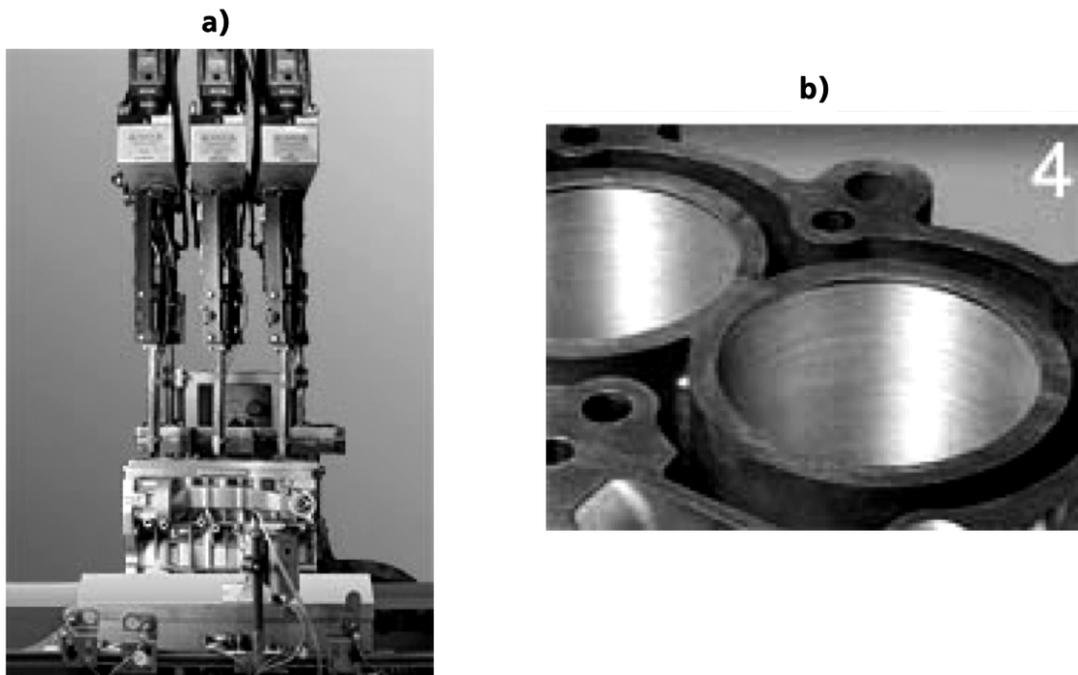
**Figura 5.** Sistema protectorio de álabes de turbina refrigerados.

*Figure 5. Protective system for refrigerated turbine blades.*



**Figura 6.** Implantes óseos para, a) prótesis dental y b) para cadera.

*Figure 6. Bone implants for a) dental prosthesis and b) hips.*



**Figura 7.** a) Bloque de cilindros de automóvil siendo recubierto mediante proyección térmica y b) aspecto de los cilindros después de ser recubiertos.

*Figure 7.* a) Automotive cylinder block being coated by thermal spray and b) cylinder appearance after coating application.

### 3.3. Automóviles<sup>[25]</sup>

La industria del automóvil realiza esfuerzos constantemente para mejorar las prestaciones y, al mismo tiempo, conseguir mayores eficiencias y menores costes. La reducción de peso y de fricción son dos de los principales métodos para aumentar la eficiencia. Para ello, el uso de recubrimientos es primordial, por una parte, porque permite utilizar componentes de aleaciones de aluminio y magnesio mucho menos pesados pero que no poseen las propiedades superficiales necesarias y, por la otra, porque permiten la reducción de la fricción. El caso típico es la camisa de los cilindros, hecha de una aleación de aluminio que, como puede verse en la figura 7, se recubre mediante proyección térmica con un recubrimiento anti-desgaste.

### 3.4. Perfiles estructurales<sup>[26]</sup>

En todo tipo de construcciones, como naves industriales, estadios deportivos, aparcamientos, invernaderos, torres eléctricas, etc., se emplea acero para la fabricación de perfiles estructurales. Estos aceros deben ser protegidos contra la corrosión medioambiental y para ello se emplea, comúnmente, el galvanizado o recubrimiento con zinc mediante inmersión en caliente (Fig. 8).

### 3.5. Espacio<sup>[27]</sup>

Los materiales poliméricos o compuestos base polimérica son muy utilizados en la construcción de estructuras espaciales tales como la Estación Espacial Internacional (Fig. 9) debido a su poco peso. Sin embargo, estos materiales sufren en su mayoría erosión por oxígeno atómico, presente en la baja órbita terrestre (alrededor de 300 Km por encima del nivel del mar). Por esta razón, deben ser protegidos y para ello se emplean óxidos de aluminio o silicio depositados por PVD o CVD.

Por otra parte, en los vehículos de uso espacial y también en los satélites, se emplean recubrimientos tribológicos que ofrecen lubricación sólida a aquellas zonas que lo necesitan como por ejemplo las superficies de control de los transbordadores espaciales.

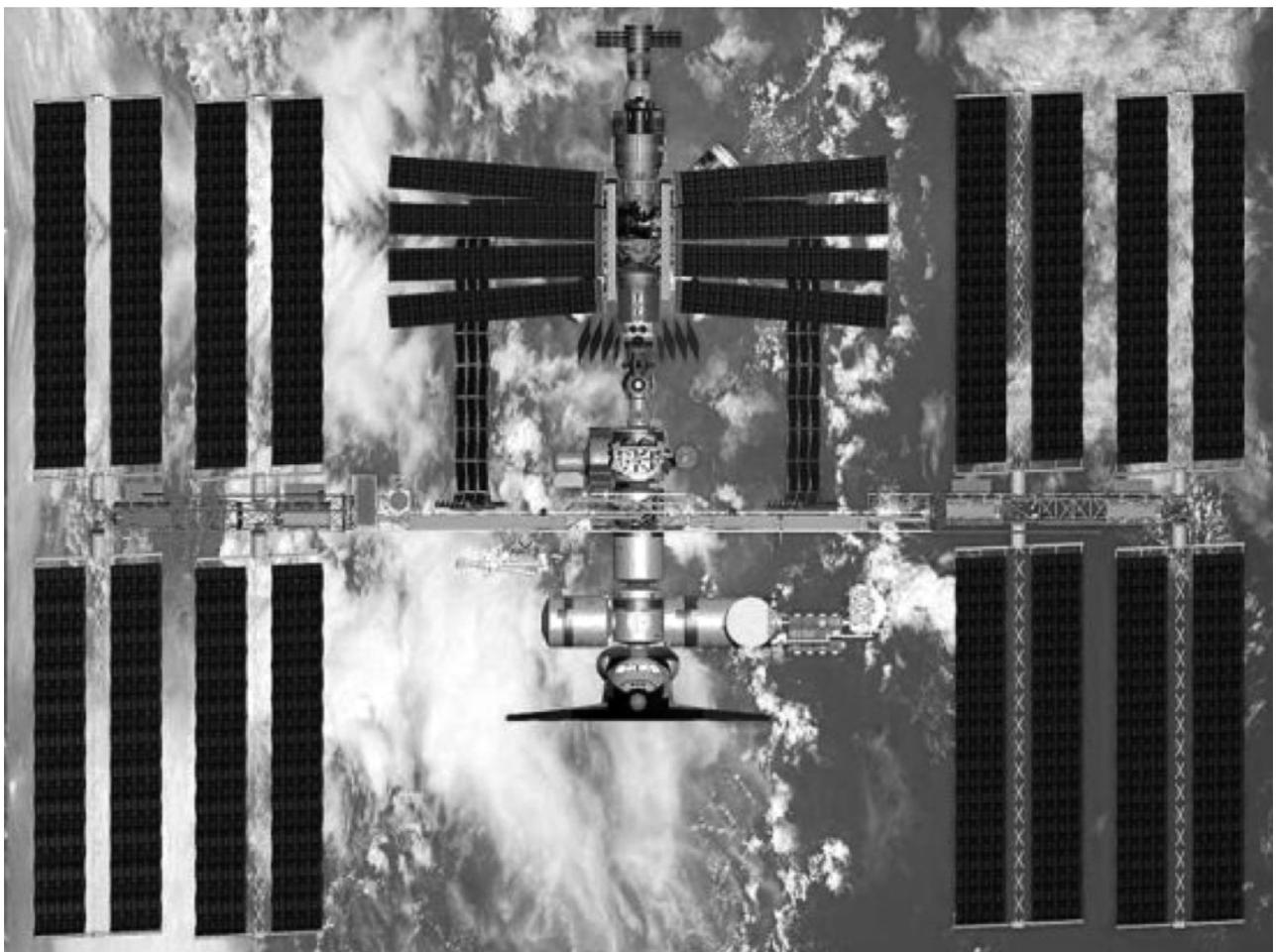
### 3.6. Herramientas de corte y conformado<sup>[28 y 29]</sup>

Para conseguir mayor durabilidad y calidad en los cortes, la mayoría de las herramientas para corte se encuentra recubiertas con capas duras tales como el carbono tipo diamante, TiN, TiC, TiAlN, etc. depositados por PVD y CVD (Fig. 10). En el caso de moldes de fabricación, estos deben ser protegidos de los materiales fundidos que van a ser moldeados (principalmen-



**Figura 8.** Proceso de galvanizado en caliente para grandes perfiles estructurales.

*Figure 8. Large structure galvanizing.*



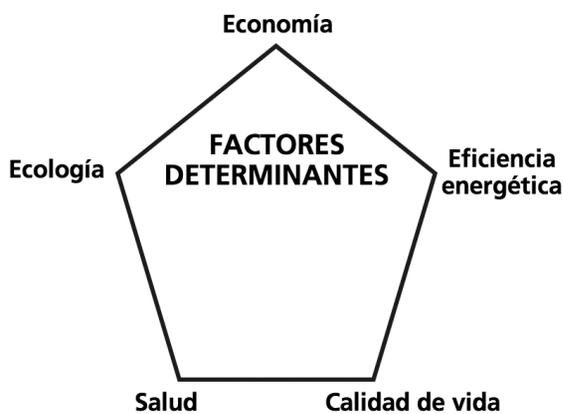
**Figura 9.** Estación Espacial Internacional.

*Figure 9. International Space Station.*



**Figura 10.** Herramientas de corte recubiertas con TiN.

*Figure 10. Cutting tools coated with TiN.*



**Figura 11.** Factores que determinan la introducción de nuevos productos y tecnologías en el mercado.

*Figure 11. Factors determining the inclusion of new products and processes in the market place.*

te las aleaciones de aluminio). También las boquillas de extrusión en numerosas aplicaciones pueden ser recubiertas para reducir la abrasión, como por ejemplo en la fabricación de tejas.

#### 4. INGENIERÍA DE SUPERFICIES Y MEDIOAMBIENTE

Los factores socioeconómicos que determinan la introducción de nuevos productos y tecnologías en el mercado son varios, muy complejos y se encuentran inter-relacionados entre sí. La figura 11 ilustra algunos de los más importantes. Por ejemplo, primero y principalmente, es evidente que el proceso o producto tendrá que ser rentable, pero que también respe-

tará la legislación imperante que, afortunadamente, tiende cada vez más a respetar la salud, el medio ambiente y a conservar los recursos naturales.

En el caso concreto de los procesos de modificación superficial y de los productos que de ellos se generan, podemos encontrar efectos positivos y negativos en lo que se refiere al medioambiente.

##### 4.1. Efectos positivos

La protección de componentes mediante la ingeniería de superficies tiene importantes efectos positivos para el medioambiente:

- Contribución a la reducción del consumo de materiales. Como se ha mencionado repetidamente, la ingeniería de superficies alarga la vida útil de todo tipo de componentes siendo posible, en algunos casos, extenderla más allá de la misma vida útil del tratamiento correspondiente ya que algunos de estos pueden ser reparados y/o re-aplicados. Existen metales denominados “estratégicos” que son constituyentes fundamentales de las principales aleaciones o materiales empleados mundialmente y cuya disponibilidad puede verse interrumpida, bien sea por la escasez de las reservas conocidas o por la situación geográfica de los correspondientes yacimientos (vulnerabilidad frente a situaciones políticas). Estos elementos son cromo, cobalto, wolframio, manganeso, vanadio, molibdeno, niobio, paladio, rodio, iridio, osmio y platino. La ingeniería de superficies implica una disminución significativa de su consumo.
- Reducción del consumo de energía y de emisiones tóxicas. El empleo de recubrimientos ha

contribuido a un aumento significativo de la eficiencia de las turbinas de gas generadoras de electricidad o aeronáuticas (párrafo 3.1), debido a que permite que operen a mayores temperaturas. El aumento de la eficiencia resulta en una correspondiente disminución de emisiones por KW producido o por Km de vuelo respectivamente. Lo mismo ocurre en el transporte marítimo (turbinas marinas).

También, en el sector de transporte terrestre, el empleo de recubrimientos que disminuyen la fricción ha tenido un impacto importante en la reducción del consumo de combustible por Km. Por otra parte, el uso de recubrimientos facilita el empleo de materiales más ligeros como, por ejemplo, al aumentar la resistencia al desgaste de componentes fabricados de aleaciones de aluminio, mucho más ligeras que los aceros pero con poca resistencia al desgaste, contribuyendo de esta manera al correspondiente ahorro de combustible. De forma menos directa, gracias al uso de recubrimientos específicos, es posible fabricar los mencionados componentes de aleaciones de aluminio o también de magnesio, ya que dichos recubrimientos protegen los moldes de acero empleados para su manufactura que, de no llevar protección, reaccionarían con la aleación fundida.

- Efecto barrera frente a agentes “dañinos” medioambientales. El empleo de recubrimientos para el empaquetado de alimentos tiene como finalidad impedir o retardar el paso del  $O_2$  y  $H_2O$  medioambientales con la finalidad de mantener la frescura y la calidad del alimento por mayor tiempo. Se emplean capas finas de Al,  $Al_2O_3$  o  $SiO_2$ . Otro ejemplo es el empleo de capas muy finas como filtros para radiaciones dañinas como por ejemplo la ultravioleta, en la protección para gafas, cristales arquitectónicos y cabinas de aviones.

## 4.2. Efectos negativos

Como cualquier proceso industrial, la deposición de recubrimientos conlleva algunas interacciones negativas con el medioambiente, por ejemplo, la descarga de residuos que estos procesos puedan generar, la toxicidad y/o peligrosidad de los productos químicos empleados o resultantes, tales como solventes orgánicos, metales pesados, etc. Sin embargo, afortunadamente, la legislación referente a todos estos aspectos es cada vez más restrictiva y como consecuencia se están realizando esfuerzos para mejorar los tratamientos de residuos, para reemplazar aquellos procesos que resulten demasiado negativos para la salud y el medioambiente o para

encontrar procesos alternativos con impactos mínimos. Esta situación se ilustra con dos ejemplos:

- Aplicación de pinturas en la industria del automóvil. En esta industria, la aplicación de pinturas se realiza a gran escala. Algunos de los problemas con sus respectivas soluciones se detallan a continuación:
  - Preparación superficial. Las superficies a recubrir se preparan tradicionalmente mediante chorreado con arena. Esta, puede causar problemas respiratorios a los trabajadores y por esta razón se ha comenzado a reemplazar por otros abrasivos menos tóxicos. Un ejemplo muy reciente es el uso de partículas de  $CO_2$  sólido (hielo seco) que no dejan residuo alguno ya que se evaporan después de haber cumplido su misión.
  - Reemplazo de disolventes orgánicos tóxicos. La gran mayoría de las pinturas empleadas en esta industria se basan en solventes orgánicos que, como es bien conocido, no solo son perjudiciales para la salud de los trabajadores, sino que también para el medio ambiente causando, entre otras cosas, la destrucción de la capa de ozono. En la actualidad ya se ha comenzado a reemplazar dichas pinturas por otras hidrosolubles, sólidas o con menor contenido de VOC (compuestos orgánicos volátiles).
  - Reemplazo de pigmentos tóxicos. Gran parte de los pigmentos constitutivos de las pinturas son muy tóxicos (CrVI, plomo, mercurio, estaño, etc.) y, por esta razón, han comenzado a reemplazar por sales de zinc, bario y calcio, pigmentos vegetales, etc., de mucha menor toxicidad.
- Reemplazo del cromo duro. Los recubrimientos de cromo duro poseen una gran resistencia al desgaste y a la corrosión medioambiental y, en consecuencia, tienen un gran número de aplicaciones en las industrias aeronáutica, automotriz, componentes de funcionamiento hidráulico, válvulas, herramientas, componentes de imprentas, etc. Se depositan por electrodeposición a partir de Cr (VI), una especie muy cancerígena y que por lo tanto está sujeta a una legislación cada vez más restrictiva en cuanto a los límites de exposición y de descarga de efluentes permitidos. Por esta razón, su producción está alcanzando precios inadmisibles y en algunos casos se ha prohibido su uso. Ha sido necesario, en consecuencia, dedicar grandes esfuerzos a nivel mundial para buscar alternativas al uso de estos recubrimientos con tan buenas prestaciones pero que representan un impacto muy negativo tanto para la salud

**Tabla II.** Propiedades de recubrimientos de Cr duro y de algunas de sus alternativas depositadas por proyección térmica por HVOF

Table II. Properties of hard Cr as well as some of its alternative coatings deposited by HVOF thermal spray

Propiedades	Cromo duro	Alternativas por HVOF
Resistencia al desgaste/ Coeficiente de fricción	Buena / Bajo	En función del material. Recubrimientos comparables al cromo duro: WCCoCr, NiCrMo, CoMoCrSi
Resistencia a la Corrosión	Media	En función del material y del medio corrosivo: recubrimientos tales como WC-CrCo, CrNi-acero e Inconel ofrecen mejor resistencia que el cromo duro
Fatiga	Mala	Altas tensiones residuales que generan microgrietas. Mejor que el Cromo duro. Algunos recubrimientos, sobre todo los carburos, pueden ser producidos con tensiones compresivas
Máxima temperatura de servicio	Hasta 400 °C, pero a partir de 200 la dureza disminuye	En función del material, por Ej.: WCCoCr hasta 550°C Cr3C2-NiCr hasta 950°C

de los trabajadores como para el medioambiente en general.

Entre los principales candidatos están siendo estudiados los recubrimientos tipo *cermet* depositados por proyección térmica por alta velocidad (HVOF). En la tabla II, se ilustran algunas propiedades de estos recubrimientos en comparación con el de cromo duro.

## 5. CONCLUSIONES

De la ingeniería de superficies se deriva un impacto medioambiental beneficioso porque, por una parte, contribuye a optimizar el “consumo” de materiales y, por otra, conduce a un ahorro energético significativo con su correspondiente efecto positivo en la economía mundial. Afecta directamente, también de forma beneficiosa, a la salud, la calidad de aguas y suelos y, en general, a la calidad de vida. Como todo proceso industrial, aquellos entrañados por la ingeniería de superficies interactúan con el medio ambiente por los efluentes que generan y por la peligrosidad o toxicidad inherente a alguno de ellos. Sin embargo, actualmente se dedican grandes esfuerzos de I+D para desarrollar nuevas técnicas y nuevos recubrimientos y para mejorar la calidad de los ya existentes, tomando muy en cuenta la salud y las interacciones con el medio ambiente, con la finalidad de minimizar o eliminar los efectos negativos.

## REFERENCIAS

[1] *ASM Handbook, Surface Engineering, V 5*, ASM International, Materials Park, Ohio, EE.UU., 1994, pp. 126-135.

[2] K.G. BUDINSKI, *Surface Engineering for Wear Resistance*, Prentice Hall, 1988, pp. 120-137.  
 [3] *ASM Handbook, Lubrication and Wear Technology, V 18*, ASM International, Materials Park, Ohio, EE.UU., 1992, pp. 861-872.  
 [4] V. AMIGÓ, Y. PINEDA, F. SEGOVIA Y A. VICENTE, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 403-408.  
 [5] J.R. DAVIES, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, ASM International, Materials Park, Ohio, EE.UU., 2001, pp. 112-116.  
 [6] R. BIANCO Y R.A. RAPP, *Metallurgical and Ceramic Coatings*, Ed. K.H. Stern, Chapman and Hall, Glasgow, England, 1996, pp. 236-263.  
 [7] M.F. STROOSNIJDER E I.F. NORTON, *Surf. Interf. Anal.* 22 (1994) 436-440.  
 [8] *ASM Handbook, Surface Engineering, V 5*, ASM International, Materials Park, Ohio, EE.UU., 1994, pp. 378-411 y 482-493.  
 [9] E. ESCUDERO, M.J. BARTOLOMÉ, V. LÓPEZ, J. SIMANCAS, J.A. GONZÁLEZ, M. MORCILLO Y E. OTERO, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 133-138.  
 [10] J.W. DINI, *Electrodeposition: The Materials Science of Coatings and Substrates*, Noyes, (1993)  
 [11] G. O. MALLORY Y J.B. HAIDU, *Electroless Plating: Fundamentals and Applications*, American Electroplaters and Surface Finishers Society, INC., EE.UU., 1990.  
 [12] A.R. MARDER, *Prog. Mater. Sci.* 45 (2000) 191-275.  
 [13] H.E. TOWSENS, L. ALLEGRA, R.J. DUTTON Y S.A. KRINER, *Mater. Perform.* (1986) 36- 46.  
 [14] D. MATTOX, *Handbook of Physical Vapour Deposition Processing (PVD)*, Lattice Press, Sunset Beach, CA, EE. UU., 1998.  
 [15] K.L. CHOY, *Prog. Mater. Sci.* 48 (2003) 57-170.

- [16] M.R. DORFMAN, *Ad. Mater. Proces.* 160 (2002) 66-68.
- [17] L.J. LI Y J. MAZUMDER, *Laser Processing of Materials*, Eds. K. Mukherjee y J. Mazumder, The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, EE.UU., 1985, p. 35.
- [18] G.P. RODRÍGUEZ, M. CHECA Y J.J. DE DAMBORENEA, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 513-517.
- [19] S. GRAINGER, *Engineering Coatings, Design and Applications*, Abington Publishing, 1989, p. 33.
- [20] J. BENTLEY Y G.P.A. TURNER, *Química y tecnología de pinturas y revestimientos*, A. Madrid Vicente Ediciones, Madrid, España, 1999.
- [21] J.D. GAD, J.F. NEJEDLIK Y L. D. GRAHAM, *Electrochem. Technol.* 6 (1968) 307-315.
- [22] J.R. DAVUES, *High Temperature Coatings for Superalloys, ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt and their Alloys*, ASM international, Materials Park, Ohio, EE.UU., 2000, pp. 281-290.
- [23] P.A. DEARNLEY, *J. Eng. Med.* 213 (1999) 107-135.
- [24] E. PEÓN, A. JIMÉNEZ-MORALES, E. FERNÁNDEZ-ESCALANTE, M.C. GARCÍA-ALONSO, M.L. ESCUDERO Y J.C. GALVÁN *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 479-482.
- [25] G. BARBEZAT, *Int. J. Automot. Technol.* 2 (2001) 47-52.
- [26] *Hot Deep Galvanizing for Corrosion Protection of Steel Products*, American Galvanizers Association (1989)
- [27] I. KLEIMAN Y Z. A. ISKANDEROVA, *Proc. 8th Int. Symp. Mat. in a Space Environment and 5th Internat. Conf. Protection Materials Structures LEO Space Environment*, ESA, (2000).
- [28] R. HAUERT, J. PATSCHEIDER, *Ad. Eng. Mater.* 2 (2000) 247-259.
- [29] M. KUPCKYK Y W. MISIAK, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 483-487.