

Tratamientos termoquímicos

Thermochemical Treatments

Martín Ortiz-Domínguez^a, Arturo Cruz-Avilés^b, Irving Morgado-González^c, José M. Farfán-García^d, Javier Hernández-Pérez^e, Juan D. Cruz-Bustamante^f

Abstract:

In the present work, a very general description of the main thermochemical treatments used to improve the surface properties of various substrates is given. Surface engineering represents a technically attractive and economically viable method for improving the surface layer of materials. Since the surface of the material controls the useful life in many applications, the aim is to develop a wide range of functional properties that are different from the base substrate, including physical, chemical, electrical, electronic, magnetic or mechanical. As part of surface engineering, thermochemical treatment uses thermal diffusion to incorporate non-metallic or metallic atoms on the surface of the substrate to modify its chemistry and microstructure. The thermochemical treatments can be performed on solid, liquid or gaseous media with one or more active chemical elements simultaneously. For most thermochemical treatments, the mechanism includes the decomposition of solid, liquid or gaseous species, the division of gaseous molecules to form nascent atoms, the absorption of atoms, their diffusion in a metallic network and reactions within the substrate structure to modify existing phases or form new ones.

Keywords:

Thermochemical treatment, hardness, diffusion, layer, surface

Resumen:

En el presente trabajo, se hace un descripción muy general de los principales tratamientos termoquímicos empleados para mejorar las propiedades en la superficie de diversos sustratos. La ingeniería de superficies representa un método técnicamente atractivo y económicamente viable para mejorar la capa superficial de los materiales. Dado que la superficie del material controla la vida útil en muchas aplicaciones, el objetivo es desarrollar una amplia gama de propiedades funcionales que son diferentes del sustrato base, incluyendo las físicas, químicas, eléctricas, electrónicas, magnéticas o mecánicas. Como parte de la ingeniería de superficies, el tratamiento termoquímico emplea la difusión térmica para incorporar átomos no metálicos o metálicos en la superficie del material para modificar su química y microestructura. Los tratamientos termoquímicos se pueden realizar en medios sólidos, líquidos o gaseosos con uno o varios elementos químicos activos simultáneamente. Para la mayoría de los tratamientos termoquímicos, el mecanismo incluye la descomposición de especies sólidas, líquidas o gaseosas, la división de moléculas gaseosas para formar átomos nacientes, la absorción de átomos, su difusión en una red metálica y reacciones dentro de la estructura del sustrato para modificar fases existentes o formar nuevas.

Palabras Clave:

Tratamiento termoquímico, dureza, difusión, capa, superficie

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx;

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-0455-1646>, Email: arturo_cruz8085@uaeh.edu.mx;

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-7831-1752>, Email: imorgadog@hotmail.com;

^d Universidad Politécnica de Pachuca, <https://orcid.org/0000-0002-0739-4079>, Email: jmfarfang@gmail.com;

^e Universidad Politécnica de Pachuca, <https://orcid.org/0000-0003-0371-4255>, Email: jahdez@upp.edu.mx;

^f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-6346-5118> Email: danielbustamantecruz@gmail.com;

INTRODUCCIÓN

En la actualidad y debido al creciente desarrollo tecnológico es necesario disponer de materiales metálicos con características específicas las cuales deben de mantenerse en condiciones de servicio críticas, por ejemplo, las matrices metálicas que se usan en los diferentes procesos metalúrgicos de trabajo en frío y en caliente, las cuales dadas las condiciones de trabajo necesitan de una alta tenacidad y elevada dureza superficial.

El endurecimiento superficial, un proceso que incluye una amplia variedad de técnicas como se muestra en la Tabla 1, se utiliza para mejorar la resistencia al desgaste de las piezas sin afectar el interior más suave y resistente de la pieza. Esta combinación de superficie dura y resistencia a la rotura en caso de impacto es útil en piezas como un engranaje de leva o anillos que debe tener una superficie muy dura para resistir el desgaste, junto con un interior duro para resistir el impacto que ocurre durante la operación. Además, el endurecimiento de la superficie del acero tiene una ventaja sobre el templado, porque es menos caro en aceros de bajo-medio carbono los cuales pueden ser endurecidos superficialmente sin los problemas de distorsión y del agrietamiento asociado con el templado de secciones gruesas. 1, 2

Existen tres enfoques claramente diferentes para los diversos métodos de endurecimiento de superficies (ver Tabla 1):

Métodos de difusión termoquímica.- Son aquellos que modifican la composición química de la superficie con especies endurecedoras como carbono, nitrógeno y boro. Los métodos de difusión permiten el endurecimiento efectivo de toda la superficie de una pieza y se utilizan generalmente cuando un gran número de piezas se van a endurecer superficialmente. Los tratamientos más comunes en la industria son carburización, nitruración, carbonitruración y borurización. 3

Métodos energéticos o térmicos aplicados.- Son los que no modifican la composición química de la superficie, sino que mejoran sus propiedades alterando la metalurgia superficial, es decir, producen una superficie templada dura sin especies de aleación adicionales. 4

Recubrimientos de superficie o métodos de modificación de superficies.- Son aquellos que impliquen la acumulación intencional de una nueva capa sobre el

substrato de acero o, en el caso de la implantación iónica, alteren la composición química del sub-superficial. 5

Métodos de difusión	Métodos de energía aplicada	Modificación superficial y recubrimiento
<ul style="list-style-type: none"> - Carburizado. - Nitrurado. - Carbonitrurado. - Nitrocarburoado. - Borurado. - Proceso de difusión térmica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Endurecimiento por flama. - Endurecimiento por irradiación. - Endurecimiento por rayo láser. - Endurecimiento por haz de electrones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cromado duro. - Niquelado electrolítico. - Pulverización térmica. - Soldadura dura. - Depósitos químicos de vapor. - Deposition física de vapor. - Implantación iónica. - Procesamiento de superficie con láser.

Tabla 1. Métodos de ingeniería para el endurecimiento superficial de aceros.

Fuente: (Elaboración propia)

Cada uno de estos enfoques para el endurecimiento de superficies se examina brevemente en este trabajo, haciendo hincapié en las comparaciones de procesos para facilitar la selección de procesos.

MÉTODOS DE DIFUSIÓN O TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Como se mencionó anteriormente, el endurecimiento de superficie por difusión implica la modificación química de una superficie. El proceso básico utilizado es termoquímico, ya que se necesita algo de calor para mejorar la difusión de las especies de endurecimiento en las regiones de superficie y subsuelo de una parte. La profundidad de difusión presenta una dependencia tiempo-temperatura tal que:

$$\text{Profundidad} \propto k\sqrt{\text{Tiempo}} \quad (1)$$

donde la constante de difusividad k , depende de la temperatura, la composición química del acero y el gradiente de concentración de una especie de endurecimiento dada. En términos de temperatura, la constante de difusividad aumenta exponencialmente en función de la temperatura absoluta. Los gradientes de concentración dependen de la cinética de la superficie y de las reacciones de un proceso particular.

Los métodos de endurecimiento por difusión incluyen varias variaciones de especies endurecedoras (como carbono, nitrógeno o boro) y del método de proceso utilizado para manejar y transportar las especies de endurecimiento a la superficie de la pieza. Los métodos de proceso de exposición implican el manejo de especies endurecedoras en forma de gas, líquido o iones. Estas variaciones de proceso producen naturalmente diferencias típicas en la profundidad y dureza (ver Tabla

2). Los factores que influyen en la idoneidad de un método de difusión particular son el tipo de acero, la dureza y la profundidad del recubrimiento deseado. 1, 6

Proceso	Temperatura de recubrimiento	Temperatura de proceso °C (°F)	Profundidad típica de recubrimiento	Tamaño IDC	Material base típico	Características del proceso
Carburación						
Empaquetamiento	Carburo sólido	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Este método de proceso difícil de controlar la profundidad de la capa de carbono.
Baño	Carburo sólido	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Este método de la profundidad de la capa, está controlado por el tiempo de exposición, controla el contenido de carbono de gas, presión y flujo.
Líquido	Carburo sólido y baño de sal	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Este método puede producir un empacquetamiento a gran escala, pero requiere un control de calidad, los factores de este proceso, generalmente son:
Vacío	Carburo sólido	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Resistencia control de proceso, puede trabajar, una medida para la reducción de gas, cuando se usa.
Nitruación						
Baño	Nitruación sólido, compuesto de nitrógeno	500-550 (930-1030)	0.05-0.10 mm (0.002-0.004)	10-100	Acero al carbono, acero al níquel, acero inoxidable	Recubrimiento más lento que el de carbono, el tipo de acero, la temperatura, la presión, el tiempo de exposición, el flujo de gas, generalmente se controla por tiempo.
Vacío	Nitruación sólido, compuesto de nitrógeno	500-550 (930-1030)	0.05-0.10 mm (0.002-0.004)	10-100	Acero al carbono, acero al níquel, acero inoxidable	Recubrimiento más lento que el de carbono, el tipo de acero, la temperatura, la presión, el tiempo de exposición, el flujo de gas, generalmente se controla por tiempo.
Baño	Nitruación sólido, compuesto de nitrógeno	500-550 (930-1030)	0.05-0.10 mm (0.002-0.004)	10-100	Acero al carbono, acero al níquel, acero inoxidable	Recubrimiento más lento que el de carbono, el tipo de acero, la temperatura, la presión, el tiempo de exposición, el flujo de gas, generalmente se controla por tiempo.
Carburación en gas						
Baño	Carburo sólido y compuesto de carbono	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Resistencia control de proceso, puede trabajar, una medida para la reducción de gas, cuando se usa.
Líquido (carburación)	Carburo sólido y compuesto de carbono	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Resistencia control de proceso, puede trabajar, una medida para la reducción de gas, cuando se usa.
Carburación en vacío	Carburo sólido y compuesto de carbono	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Resistencia control de proceso, puede trabajar, una medida para la reducción de gas, cuando se usa.
Otros						
Baño	Carburo sólido y compuesto de carbono	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Resistencia control de proceso, puede trabajar, una medida para la reducción de gas, cuando se usa.
Vacío	Carburo sólido y compuesto de carbono	850-950 (1560-1740)	0.10-0.25 mm (0.004-0.010)	10-100	Acero de bajo carbono, acero al carbono de baja ley	Resistencia control de proceso, puede trabajar, una medida para la reducción de gas, cuando se usa.

Tabla 2. Características típicas de los tratamientos difusivos.

Fuente (Elaboración propia)

También es importante distinguir entre la profundidad total y la profundidad efectiva del recubrimiento. La profundidad efectiva suele ser de aproximadamente dos tercios a tres cuartos de la profundidad total del recubrimiento. La profundidad efectiva requerida debe especificarse de manera que el tratamiento térmico pueda procesar las piezas en el momento correcto a la temperatura adecuada.

Carburación

Carburación es la adición de carbono en la superficie de los aceros de bajo carbono a temperaturas generalmente entre 850 y 950 °C, (1560 y 1740 °F) en la que la austenita, con su alta solubilidad para el carbono, es la estructura cristalina estable. El endurecimiento del componente se logra quitando la pieza y templando o permitiendo que la pieza se enfríe lentamente y luego recalentando a la temperatura de austenización para mantener la propiedad de superficie muy dura. En el temple, un buen recubrimiento martensítico de alto carbono resistente al desgaste y la fatiga se superpone a un núcleo de acero duro y de bajo carbono.

Los aceros carburizados utilizados en el cementado suelen tener un contenido de carbono básico de aproximadamente 0,2% en peso, siendo el contenido de carbono de la capa carburada fijado entre 0,8 y 1,0% en peso. Los métodos de carburación incluyen carburación en gas, carburación en vacío, carburación en plasma (ion), carburación en baño de sal, y carburación de

empaquetamiento en caja. La gran mayoría de las piezas carburadas se procesan mediante carburación de gas, utilizando gas natural, propano o butano. La carburación por vacío y plasma es útil debido a la ausencia de oxígeno en la atmósfera del horno. La carburación de baño de sales y de empaquetamiento en caja tienen poca importancia comercial, pero todavía se hacen ocasionalmente. 7

Carburación en gas.- La carburación de gas se puede ejecutar como un lote o un proceso continuo. Las atmósferas del horno consisten en un gas portador y un gas enriquecedor. El gas portador se suministra a un alto caudal para garantizar una presión positiva del horno, minimizando la entrada de aire en el horno. El tipo de gas portador afecta la tasa de carburación. La carburación por metano es más lenta que por la descomposición del monóxido de carbono (CO). El gas de enriquecimiento proporciona la fuente de carbono y se suministra a un ritmo necesario para satisfacer la demanda de carbono de la carga de trabajo.

La mayor parte de la carburación de gas se realiza en condiciones de potencial de carbono controlado mediante la medición del contenido de CO y dióxido de carbono (CO₂). El objetivo del control es mantener un potencial de carbono constante, igualando la pérdida de carbono en la pieza de trabajo con el suministro de gas de enriquecimiento. El proceso de carburación es complejo, y un modelo completo de carburación requiere algoritmos que describen los diversos pasos en el proceso, incluyendo la difusión de carbono, cinética de la reacción superficial, cinética de la reacción entre el endogas y el gas de enriquecimiento, purga (para procesos por lotes), y el sistema de control atmosférico.

Carburación en vacío.- Es un proceso de carburación de tipo de impulso no equilibrado en que la austenización tiene lugar en un vacío en bruto, seguido de la carburación en una presión parcial de gas hidrocarburo, difusión en un vacío en bruto, y luego templado en cualquier aceite o gas. La carburación en vacío ofrece las ventajas de una excelente uniformidad y reproducibilidad debido a la mejora del control del proceso con hornos de vacío, la mejora de las propiedades mecánicas debido a la falta de oxidación intergranular y la reducción del tiempo de ciclo. Las desventajas de la carburación en vacío están principalmente relacionadas con los costes de equipo y rendimiento.

Carburación por plasma (ion).-Este método de carburación es básicamente un proceso de vacío que utiliza tecnología de descarga luminosa para introducir iones portadores de carbono en la superficie de acero para su posterior difusión. Este proceso es eficaz para aumentar las tasas de carburación, ya que el proceso pasa por alto varios pasos de disociación que producen carbono soluble activo.

Por ejemplo, debido al efecto ionizante de los plasmas, el carbono activo para la adsorción puede formarse directamente a partir del gas metano (CH₄). Las altas temperaturas se pueden utilizar en la carburación en plasma, ya que el proceso se lleva a cabo en un vacío sin oxígeno, produciendo así una mayor profundidad de capa carburizada que en la carburación en gas atmosférico y en vacío.

Carburación líquida o baño de sales.- Es un método de cementación de acero en un baño de sal fundida que contiene los productos químicos necesarios para producir una capa comparable con una resultante de la carburación en gas o de empaquetamiento en caja. La carburación en baños de sal líquida proporciona un método conveniente de cementado, con baja distorsión y considerable flexibilidad y uniformidad de control de la capa. Sin embargo, el gasto y los problemas ambientales asociados con la eliminación de los baños de sal, en particular los que contienen cianuro, han limitado el uso de este proceso, aunque se han desarrollado sales no cianuradas.

Carburación de empaquetamiento en caja.- Es el proceso de carburación más antiguo. En este método de cementado, las piezas se envasan en una mezcla de coque y carbón vegetal con *activadores* y luego se calientan en un recipiente cerrado. Aunque se trata de un proceso intensivo en mano de obra, la carburación de empaquetamiento en caja se sigue practicando en algunas salas de herramientas, porque los requisitos de las instalaciones son mínimos. 8

Nitruración

El nitrurado es un proceso similar a la carburación, en el que el nitrógeno se difunde en la superficie de un producto ferroso para producir una capa dura. A diferencia de la carburación, el nitrógeno se introduce entre 500 y 550°C (930 y 1020°F), que está por debajo de la temperatura de formación de austenita (A_{c1}) para

los aceros ferríticos, y el temple no es necesario. Como resultado de no austenización y temple para formar martensita, en la nitruración la distorsión resulta mínima y un control excelente. Los diversos procesos de nitruración se muestran en la Tabla 2.2, e incluyen nitruración en gas, nitruración líquida, y nitruración en plasma (ion).

Nitruración en gas.- Es un proceso de cementado que tiene lugar en presencia de gas amoníaco. Se puede utilizar un proceso de una o dos etapas cuando se nitrura con amoníaco anhídrico. El proceso de una sola etapa, en el que se utiliza una temperatura de 495 a 525°C (925 a 975°F), produce la zona compuesta rica en nitrógeno frágil conocida como capa de nitruro blanco en la superficie del recubrimiento nitrurado. El proceso de doble etapa, o proceso de Floe, tiene la ventaja de reducir el espesor de la capa de nitruro blanco. Después de la primera etapa, se añade una segunda etapa, ya sea continuando con la temperatura de la primera etapa o aumentando la temperatura a 550 a 565°C (1025 a 1050°F). El uso de la segunda etapa de temperatura más alta reduce la dureza del recubrimiento y aumenta la profundidad del mismo.

Nitruración líquida.- Es también conocida como (nitruración en un baño de sal fundida), utiliza temperaturas similares a las utilizadas en la nitruración en gas y un medio de cementado en baño de sal fundida, con nitrógeno, que contiene cianuros o cianatos. Similar a la carburación en baño de sal, la nitruración líquida tiene la ventaja de procesar piezas acabadas porque la estabilidad dimensional se puede mantener debido a las temperaturas sub-críticas utilizadas en el proceso. Además, a las temperaturas más bajas de nitruración, el nitrurado líquido añade más nitrógeno y menos carbono a los materiales ferrosos que el obtenido con tratamientos de alta temperatura porque la ferrita tiene una solubilidad mucho mayor para el nitrógeno (0,4% máx) que el carbono (0,02% máx).

Nitruración por plasma (ion).- Es un método de endurecimiento superficial empleando tecnología de descarga luminosa para introducir nitrógeno naciente (elemental) en la superficie de una pieza metálica para su posterior difusión en el material. El proceso es similar a la carburación de plasma en que un plasma se forma en un vacío utilizando energía eléctrica de alto voltaje, y los iones de nitrógeno se aceleran hacia la pieza de trabajo. El bombardeo iónico calienta la pieza, limpia la superficie y proporciona nitrógeno activo. El proceso proporciona un

mejor control del recubrimiento químico, uniformidad de recubrimiento y baja distorsión en la pieza en comparación con la nitruración en gas. 9, 10

Carbonitruración y nitrocarburation ferrítica

Carbonitruración.- En este proceso se introduce tanto carbono como nitrógeno en la austenita del acero. El proceso es similar a la carburación en que la composición austenítica es mejorada y la alta dureza de la superficie se produce por temple para formar martensita. Este proceso es una forma modificada de carburación en gas en la que se introduce amoníaco en la atmósfera de carburación de gas. Como en la nitruración en gas, el nitrógeno elemental se forma en la superficie de la pieza de trabajo y se difunde junto con el carbono en el acero. Típicamente, la carbonitruración tiene lugar a una temperatura más baja y un tiempo de tratamiento más corto que la carburación en gas, produciendo un recubrimiento menos profundo. Los aceros con un contenido de carbono de hasta el 0,2% son comúnmente carbonitrurados. 11

Nitrocarburation ferrítica.- Es un proceso subcrítico de tratamiento térmico, realizado por líquido, técnicas gaseosas o plasmáticas, e implica la difusión de carbono y nitrógeno en la fase ferrítica. El proceso resulta en la formación de una fina capa blanca o capa compuesta con una zona de difusión subyacente de nitrógeno disuelto en hierro, o nitruros de aleación. La capa blanca mejora la resistencia de la superficie al desgaste y la zona de difusión aumenta el límite de resistencia a la fatiga, especialmente en aceros al carbono y de baja aleación. Se pueden tratar aceros aleados, hierro fundido y algunos aceros inoxidable. El proceso se utiliza para producir una capa delgada y dura, normalmente de menos de 25 μm (1 mil) de espesor, en aceros de bajo carbono en forma de piezas de chapa metálica, piezas metalúrgicas en polvo, pequeños piñones de eje, etc. 11

Borurización

El borurado, o borurizado, es un proceso termoquímico de endurecimiento superficial que se puede aplicar a una amplia variedad de materiales ferrosos, no ferrosos y cermet. El proceso de borurización de empaquetamiento en caja es similar a la carburación en caja, con las partes a recubrir que se envasa con un compuesto que contiene boro como polvo de boro o ferroboro. Se añaden activadores como compuestos de cloro y flúor para mejorar la producción del gas rico en boro en la superficie de la pieza.

El procesamiento de aceros para herramientas de alta velocidad que fueron previamente templados se realiza a 540°C (1000°F). El borurizar a temperaturas más altas hasta 1090°C (2000°F) hace que aumenten las tasas de difusión, reduciendo así el tiempo de proceso. El recubrimiento de boro no tiene que ser templado para obtener su alta dureza, pero los aceros herramienta procesados en el rango de la temperatura de austenización necesitan ser templados a la temperatura del revestimiento para endurecer el sustrato. El borurizado se aplica con mayor frecuencia a los aceros para herramientas u otros sustratos que ya están endurecidos por el tratamiento térmico. Las superficies de boruro delgadas (12 a 15 μm , o 0.48 a 0.6 mil) proporcionan una mayor dureza, mejorando la vida útil del desgaste.

La distorsión de las altas temperaturas de procesamiento es un problema importante para revestimientos borurizados. Las piezas terminadas que son capaces de tolerar unas milésimas de pulgada (75 μm) de distorsión son más adecuadas para esta secuencia de proceso, porque el delgado revestimiento no puede ser acabado de tierra. 12-17

Procesos de difusión térmica

El proceso de difusión térmica (*TD por sus siglas en inglés*) es un método de recubrimiento de aceros con una capa dura y resistente de carburos, nitruros o carbonitruros. En el proceso TD, el carbono y el nitrógeno en el sustrato de acero se difunden en una capa depositada con un elemento formador de carburo o nitruro, como vanadio, niobio, tantalio, cromo, molibdeno o tungsteno.

El carbono difundido o nitrógeno reacciona con los elementos formadores de carburo y nitruro en el recubrimiento depositado para formar una capa de carburo o nitruro densa y metalúrgicamente unida en la superficie del sustrato. Los revestimientos de una aleación dura de carburo, nitruro y carbonitruro en el método TD se pueden aplicar a los aceros por medio de procesamiento de baño de sales o lechos fluidizados. El método de baño de sales utiliza bórax fundido con la adición de elementos formadores de carburos, tales como vanadio, niobio, titanio o cromo, que se combinan con el carbono del acero del sustrato para producir capas de aleación de carburos. Debido a que el crecimiento de las capas depende de la difusión de carbono, el proceso requiere una temperatura relativamente alta, de 800 a 1250°C (1470 a 2280°F), para mantener las tasas de recubrimiento adecuadas. Los espesores de los recubrimientos de carburo de 4 a 7 μm se producen en

10 min a 8 h, dependiendo de la temperatura del baño y el tipo de acero. Los aceros recubiertos pueden ser enfriados y recalentados para su endurecimiento, o la temperatura del baño puede ser seleccionada para corresponder a la temperatura de austenización del acero, permitiendo que el acero sea templado directamente después del recubrimiento. 18-20

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL MEDIANTE ENERGÍA APLICADA

Endurecimiento por flama.- Consiste en austenitizar la superficie de acero calentando con una antorcha de oxiacetileno u oxihidrógeno y enfriando inmediatamente con agua. Después del enfriamiento, la microestructura de la capa superficial consiste en martensita dura sobre un núcleo interior de menor resistencia de otras morfologías de acero, como la ferrita y la perlita. Un requisito previo para el correcto endurecimiento por flama es que el acero debe tener el carbono adecuado y otras adiciones de aleación para producir la dureza deseada, porque no hay cambio en la composición. El equipo de endurecimiento por flama utiliza el impacto directo de una flama de alta temperatura o de una alta velocidad de combustión de producto de gases para austenizar la superficie del componente y enfriar rápidamente la superficie más rápido que la tasa de enfriamiento crítico para producir martensita en el acero.

Esto es necesario porque la capacidad de endurecimiento del componente se fija por la composición original del acero. Por lo tanto, el diseño del equipo es fundamental para el éxito de la operación. El equipo de calentamiento de flama puede ser una sola antorcha con una cabeza especialmente diseñada o un aparato elaborado que automáticamente indexa, calienta y apaga partes. Con mejoras en el equipo de mezcla de gas, medición y control de temperatura infrarroja, y el diseño de la instalación de quemadores, el endurecimiento de flama se ha aceptado como un proceso de tratamiento térmico fiable que se adapta al endurecimiento de superficies general o localizado para requisitos de producción pequeños o medianos a altos.

Calentamiento por inducción.- Es un método de calentamiento extremadamente versátil que puede realizar un endurecimiento uniforme de la superficie, endurecimiento localizado de la superficie, a través del endurecimiento, y el templado de piezas endurecidas. El calentamiento se logra colocando una pieza de acero en el campo magnético generado por la corriente alterna de alta frecuencia que pasa a través de un inductor, generalmente una bobina de cobre refrigerada por agua. La profundidad de calentamiento producida por inducción

está relacionada con la frecuencia de la corriente alterna: cuanto más alta es la frecuencia, más delgado o más superficial es el calentamiento. Por lo tanto, profundidades más profundas e incluso a través del endurecimiento se producen mediante el uso de frecuencias más bajas.

Las consideraciones eléctricas involucran los fenómenos de histéresis y corrientes turbulentas. Debido a que el calor secundario y radiante están calcinados, el proceso es adecuado para áreas de línea de producción. En la Tabla 3 se comparan los procesos de endurecimiento por flama y por inducción. Tratamiento térmico de superficie láser es ampliamente utilizado para endurecer áreas localizadas de acero y fundición componentes de máquinas de hierro. El calor generado por la absorción de la luz láser se controla para evitar la fusión y por lo tanto se utiliza en la austenización selectiva de las regiones de superficie locales, que se transforman en martensita como resultado de la refrigeración rápida (auto-apagado) por la conducción del calor en la mayor parte de la pieza. Este proceso a veces se conoce como endurecimiento de transformación láser para diferenciarlo de los fenómenos de fusión de superficie láser.

No hay ningún cambio producido por el endurecimiento de transformación láser, y el proceso, similar a la inducción y el endurecimiento de flama, proporciona una técnica eficaz para endurecer materiales ferrosos selectivamente. El proceso produce profundidades de caja típicas para acero que van de 0,75 a 1,3 mm (0,030 a 0,050 pulgadas), dependiendo del rango de potencia láser, y valores de dureza tan altos como 60 HRC. El procesamiento láser tiene ventajas sobre el endurecimiento del haz de electrones en que el endurecimiento del láser no requiere vacío, son posibles perfiles de endurecimiento más amplios, y puede haber mayor accesibilidad para obtener áreas con la flexibilidad de la manipulación óptica de la energía de la luz. 21-22

Características	Llama	Inducción
Equipamiento	Antorcha de oxicoombustible, sistema especial de enfriamiento de la cabeza.	Fuente de alimentación, inductor, sistema de enfriamiento
Material aplicable	Aleaciones ferrosas, aceros al carbono, aceros aleados, fundiciones de hierro	Igual
Velocidad de calentamiento	Pocos segundos a pocos minutos	1-10s
Profundidad de endurecimiento	1.2-6.2 mm (0.050-0.250 in.)	0.4-1.5 mm (0.015-0.060 in.), 0.1 mm (0.004 in.) por impulso
Procesamiento	Una parte a la vez	Igual
Tamaño de pieza	No limitada	Debe caber en la bobina
Revenido	Requerido	Igual
Puede ser automatizado	Si	Si
Habilidades del operador	Habilidad significativa requerida	Se requiere poca habilidad después de la configuración
Control de proceso	Atención requerida	Muy preciso
Comodidad del operador	Caliente, requiere protección para los ojos	Se puede realizar con traje
Costo		
Equipo	Bajo	Alto
Por pieza	Mejor para trabajos grandes	Mejor para trabajos pequeños

Tabla 3. Comparación de procesos de endurecimiento por llama e inducción.

Fuente: (elaboración propia)

Endurecimiento por haz de electrones.- En el endurecimiento por haz de electrones, la superficie del acero endurecible se calienta rápidamente a la temperatura austenificante, generalmente con un haz de electrones desenfocado para evitar la fusión. La masa de la pieza conduce el calor lejos de la superficie tratada a un ritmo lo suficientemente rápido como para producir endurecimiento. Los materiales para la aplicación del endurecimiento con haz de electrones deben contener suficiente contenido de carbono y aleación para producir martensita. Con el rápido calentamiento asociado a este proceso, el contenido de carbono y aleación debe estar en una forma que permita rápidamente la solución sólida completa en la austenita a las temperaturas producidas por el haz de electrones. Además, la masa de la pieza de trabajo debe ser suficiente para permitir un enfriamiento adecuado; por ejemplo, el espesor de la pieza debe ser al menos diez veces la profundidad de endurecimiento, y las zonas endurecidas deben estar adecuadamente espaciadas para evitar el temple de áreas previamente endurecidas. 23

Para producir un haz de electrones, se requiere un alto vacío de 10^{-3} Pa (10^{-5} torr) en la región donde se emiten y aceleran los electrones. Este ambiente de vacío protege al emisor de la oxidación y evita la dispersión de los electrones mientras todavía están viajando a una velocidad relativamente baja. El endurecimiento con haz de electrones en unidades de vacío duro requiere que la pieza se coloque en una cámara lo suficientemente grande como para manipular el cañón de haz de electrones o la pieza de trabajo. Generalmente las unidades fuera de vacío implican envolver de la pieza de

trabajo, en un vacío parcial (13 Pa, o 10^{-2} torr), se obtiene en la zona de trabajo mediante bombas mecánicas. 24

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL MEDIANTE RECUBRIMIENTO O MODIFICACIÓN SUPERFICIAL

Los tratamientos de recubrimiento o enchapado depositan capas de superficie dura con química, estructura y propiedades completamente diferentes en sustratos de acero y son aplicados por tecnologías bien establecidas como la electrodeposición, deposición sin electrodos, pulverización térmica, y recubrimiento duro mediante soldadura. En años más recientes, los métodos de recubrimiento o modificación de superficies han sido utilizados durante mucho tiempo en la industria electrónica para fabricar películas y dispositivos delgados para tratar los aceros. Estos incluyen técnicas de deposición de vapor y la implantación iónica. El procesamiento de superficies con láser (fusión, aleación y revestimiento) también se ha llevado a cabo en los aceros. Estos diversos tratamientos de ingeniería de superficies pueden depositar películas muy delgadas (por ejemplo, de 1 a 10 μm y para la deposición física de vapor) o revestimientos gruesos (por ejemplo, de 3 a 10 mm para el revestimiento duro de soldadura). 25

Cromado duro

Descripción del proceso.- El cromado duro se produce por electrodeposición a partir de una solución que contiene ácido crómico (CrO_3) y un anión catalítico en proporción adecuada. El metal así producido es extremadamente duro (850 a 1000 HV) y resistente a la corrosión. El espesor de chapado oscila entre 2.5 a 500 μm (0.1 a 20 mm).

Aplicaciones.- El cromado duro se utiliza para productos como anillos de pistón, choque absorbentes, puntales, pistones de freno, vástagos de válvulas de motor, camisas de cilindros y varillas hidráulicas. Otras aplicaciones son para aeronaves de aterrizaje de engranajes, textiles y rollos de huecograbado, rollos de plástico, y matrices y moldes. La reconstrucción de piezas dañadas o desgastadas comprende grandes segmentos de la industria. 25

Ventajas:

- Tratamiento a baja temperatura (60°C, o 140°F).
- Alta dureza y resistencia al desgaste.
- Bajo coeficiente de fricción.

- Capas gruesas posibles.

Desventajas:

- Mala uniformidad de espesor en componentes complejos.
- Fragilidad por hidrógeno.
- Problemas ambientales asociados con la eliminación de baños de chapado. Los revestimientos de sustitución de cromo, como el níquel sin electrodos y los revestimientos de pulverización térmica, se utilizan cada vez más.

Recubrimiento de niquelado electrolítico

Descripción del Proceso.- El recubrimiento es depositado por una reducción química autocatalítica de iones de níquel por hidrofosfito, aminoborano, o compuestos de borohidruro. Actualmente, los baños reducidos de ácido caliente de hipofosfito se eligen con más frecuencia para recubrir el acero. La dureza del depósito tratada con calor supera los 1000 HV.

Aplicaciones.- Los recubrimientos de níquel sin electrodos tienen buena resistencia a la corrosión y el desgaste y se utilizan para proteger la maquinaria que se encuentra en el petróleo, productos químicos, plásticos, óptica, impresión, minería, y las industrias alimentarias.

Ventajas:

- Tratamiento a baja temperatura (< 100 °C, o 212°F)
- Más resistencia a la corrosión que electrochapado en cromo.
- Capacidad de recubrir formas complejas uniformemente.
- Incorporación de partículas duras para aumentar dureza.
- Buena soldabilidad y brazeabilidad.

Desventajas:

- Costos más altos que el galvanizado.
- Malas características de soldadura.
- Velocidad de recubrimiento más lenta, en comparación con las tasas de métodos electrolíticos.
- Tratamiento térmico necesario para desarrollar óptimas propiedades.

Pulverización térmica

Descripción del Proceso.- La pulverización térmica es un término genérico para un grupo de procesos en los que un metal, cerámica, cermet, y algunos materiales poliméricos en forma de polvo, alambre, o varilla se alimentan a una antorcha o pistola con la que se calientan a o ligeramente por encima de su punto de fusión. Las gotas fundidas o casi fundidas de material resultantes se aceleran en una corriente de gas y se proyectan contra el sustrato para formar un revestimiento. Los métodos comúnmente empleados de recubrimientos de pulverización térmica depositada se pueden clasificar como pulverización en llama de alambre, pulverización en llama de polvo, arco eléctrico, pulverización en plasma y pulverización de oxicorte de alta velocidad (*HVOF por sus siglas en inglés*). Las características de este proceso son mostradas en la Tabla 4. 27, 28

Propiedades o características	Tipo de recubrimiento	Pulverización en llama de alambre	Pulverización en llama de polvo	Arco eléctrico	Pulverización en plasma	Pulverización (HVOF)
Fuerza de adhesión, MPa (10 ³ psi)	Metal Inconel	1400	2100	4400	561 (384)	4200
	Metal no Inconel	200	2100	410 (34)	561 (384)	4000-5000
	Aluminosilicatos	---	600 (425) ^(*)	---	---	50 (50) ^(**)
	Cerámicos	---	1000 (70) ^(*)	---	600 (300)	810 (334)
Resist. % de oxidación (300°C)	Metal Inconel	90	90	90	90	90
	Metal no Inconel	90	90	90	90	90
	Aluminosilicatos	---	1000 ^(*)	---	---	1000 ^(**)
	Cerámicos	---	90	---	90	90
Dureza	Metal Inconel	30 HRC-50	50 HRC-50 HRC	50 HRC-60	50 HRC-60 HRC	50 HRC-60 HRC
	Metal no Inconel	50 HRC-60	50 HRC-50 HRC	50 HRC-60	50 HRC-60 HRC	50 HRC-60 HRC
	Aluminosilicatos	---	50-60 HRC	---	---	50-60 HRC
	Cerámicos	---	40-50 HRC	---	40-50 HRC	50-60 HRC
Penetrabilidad	Metal Inconel	Buena	Buena	Alta	Buena	Superficie
	Aluminosilicatos	Buena	Buena	Alta	Buena	Superficie
	no Inconel	Buena	Alta	Alta	Buena	Superficie
	Cerámicos	Buena	Alta	Alta	Buena	Superficie
Tasa de desgaste de corrosión (mm/año)	Metal Inconel	1.00-2.0	1.20-2.3 (0.05-0.1)	0.05-0.1	1.20-2.0 (0.05-0.1)	1.20-2.3 (0.05-0.1)
	Metal no Inconel	1.20-2.0	1.20-2.3 (0.05-0.1)	0.05-0.1	1.20-2.0 (0.05-0.1)	1.20-2.3 (0.05-0.1)
	Aluminosilicatos	---	0.05-0.1 (0.01-0.1)	---	---	0.05
	Cerámicos	---	0.05 (0.01)	---	0.05 (0.01) max	0.05 (0.01)

(*)Revestimiento Inconel; (**)Revestimiento no Inconel.

Tabla 4. Comparación de los principales procesos de revestimiento por pulverización térmica.

Fuente: (Elaboración propia)

Endurecimiento por soldadura

Descripción del proceso.- La soldadura es un método de solidificación para aplicar recubrimientos con resistencia a la corrosión, el desgaste y la erosión. Los recubrimientos de soldadura, a veces conocido como revestimiento, ofrecen ventajas únicas sobre otros sistemas de recubrimiento en que la soldadura de recubrimiento/sustrato proporcionan una unión metalúrgica que no es susceptible de separación y puede aplicarse fácilmente sin porosidad u otros defectos. Los depósitos soldados de aleaciones de superficie se pueden aplicar en espesores mayores que la mayoría de las otras técnicas, normalmente en el rango de 3 a 10 mm. La mayoría de los procesos de soldadura se utilizan para la aplicación de revestimientos de superficie, y la

deposición *in situ* puede llevarse a cabo más fácilmente, especialmente con fines de reparación.

Aplicaciones.- Las aplicaciones de endurecido para el control del desgaste varían ampliamente, desde muy servicio de desgaste abrasivo severo, tal como trituración de roca y pulverización, a aplicaciones para minimizar el desgaste de metal a metal, tales como válvulas de control donde unas pocas milésimas de pulgada de desgaste es intolerable. El endurecido se utiliza para controlar el desgaste abrasivo, como se encuentra por los martillos de molino, herramientas de excavación, tornillos de extrusión, tijeras de corte, partes de equipos de movimiento de tierras, molinos de bolas, y piezas de trituradora. También se utiliza para controlar el desgaste de los contactos deslizantes de metal a metal no lubricados o mal lubricados, como válvulas de control, piezas de chasis de tractores y palas, y rodamientos de alto rendimiento. El endurecido también se utiliza para controlar las combinaciones de desgaste y corrosión. 27-28

Ventajas:

- Barato.
- Aplicable a componentes grandes.
- Posible recubrimiento localizado.
- Excelente recubrimiento/adherencia del sustrato.
- Altas tasas de deposición posibles.

Desventajas:

- Las tensiones residuales y la distorsión pueden causar problemas graves.
- Los defectos de soldadura pueden llevar a un fallo de la junta.
- Límites mínimos de espesor (no es práctico producir capas de menos de 2 a 3 mm de espesor).
- Número limitado de materiales de revestimiento disponibles, en comparación con la pulverización térmica.

Deposición de vapor químico (CVD)

Descripción del Proceso.- La deposición de vapor químico (*CVD por sus siglas en inglés*) implica la formación de un recubrimiento en una superficie calentada por una reacción química de la fase de vapor o gas. Las temperaturas de deposición están generalmente en el rango de 800 a 1000°C (1470 a 1830°F). Los revestimientos resistentes al desgaste más ampliamente

depositados son carburo de titanio (TiC), nitruro de titanio (TiN), carburo de cromo (Cr₃C₂), y alúmina (Al₂O₃). Los espesores se limitan a aproximadamente 10 µm debido a tensiones de desajuste de expansión térmica que se desarrollan al enfriamiento. 25

Aplicaciones.- El uso del proceso CVD para aceros se ha limitado en gran medida al recubrimiento de aceros para herramientas para resistencia al desgaste.

Ventajas:

- Alta dureza de recubrimiento; por ejemplo, los recubrimientos de TiN tienen una dureza de 2500 HV.
- Buena adherencia (siempre que el revestimiento no sea demasiado grueso).
- Buen poder penetración (es decir, uniformidad del revestimiento).

Desventajas:

- Proceso de alta temperatura (distorsión un problema).
- El recubrimiento del borde del fragmento es difícil debido a tensiones de desajuste de expansión térmica.
- Gama limitada de materiales de se pueden recubrir.
- Preocupaciones medioambientales sobre los gases de proceso.

Deposición de vapor físico (PVD)

Descripción del Proceso.- Los procesos físicos de deposición de vapor (*PVD por sus siglas en inglés*) implican la formación de un recubrimiento sobre un sustrato por deposición física de átomos, iones o moléculas de la especie de recubrimiento.

Hay tres técnicas principales para la aplicación de revestimientos de PVD: evaporación térmica, sputtering, y el recubrimiento iónico. La evaporación térmica implica el calentamiento del material hasta que forma un vapor que se condensa en un sustrato para formar un revestimiento. El sputtering implica la generación eléctrica de un plasma entre la especie de recubrimiento y el sustrato. El recubrimiento iónico es esencialmente una combinación de estos dos procesos. Una comparación de las características del proceso de PVD, CVD e implantación iónica se muestran en la Tabla 5.

Proceso	Temperatura de procesamiento, °C	Poder de penetración	Materiales de revestimiento	Aplicaciones y características especiales del revestimiento
Emposición en vacío	RT-100, ambiente < 200	Línea de visión	Procesamiento: metal, especial: acero Al (ligero aluminio amolado) (ligero compuesto cerámico)	Estructuras, ejes, mecanizados: óxidos y nitruros
Implantación iónica	200-450, vacío < 10 ⁻⁵ Torr	Línea de visión	Revestimiento: TiN, TiC	Resistencia al desgaste para herramientas, matrices, etc. Estructuras: alta dureza y alta resistencia al impacto. Dificultad por el tamaño control del proceso.
Fleco de línea: ABE	RT-500 T _{amb} de evaporación: hasta a temperatura ambiente	Mediana a través	Fleco de línea: Al, otros metales (para óxidos); ABE: TiN y otros compuestos	Estructuras, ejes, óxidos. Control y resistencia al desgaste, lubricación y revestimiento de superficies con granel.
Pulverizado	RT-500 T _{amb} de revestimiento de metal: hasta > 1000 para el metal	Línea de visión	Metales, óxidos, nitruros: TiN y otros compuestos (*)	Estructuras, ejes, resistencia al desgaste: aplicaciones (diferentes) de revestimiento: herramientas, matrices, etc. Control de tamaño control del proceso.
CVD	500-1000, ambiente 100-1200	Mapa blanco	Metales: especialmente refractarios, TiN y otros compuestos (*); SiC, SiCN	Reflector óptico y resistencia al desgaste en: matrices de metal y carbón, herramientas, etc. Control: independiente de la deposición: tamaño y posición de la

RT, temperatura ambiente; ABE, evaporación reactiva activada; T_{amb}, temperatura de fondo ambiente; (*) Compuestos: óxidos, nitruros, carburos, nitruros y boruros de Al, Si, Cr, Hf, Mo, Nb, Ni, Sn, Ta, Ti, V, W y Zr.

Tabla 5. Comparación de procesos característicos PVD, CVD e implantación iónica.

Fuente: (Elaboración propia)

Aplicaciones.- Al igual que el CVD, el proceso PVD se utiliza para aumentar la resistencia al desgaste de los aceros de herramientas mediante la deposición de recubrimientos delgados de TiN o TiC a temperaturas que oscilan entre 200 y 550°C (400 a 1025°F). Este rango de temperatura es mucho más adecuado para el revestimiento de aceros para herramientas que las temperaturas requeridas para CVD. 25

Ventajas:

- Excelente control del proceso.
- Baja temperatura de deposición.
- Recubrimientos densos y adherentes.
- Posibles revestimientos elementales, de aleación y compuestos.

Desventajas:

- Proceso de vacío con alto costo de capital.
- Tamaño de los componentes tratables es limitado.
- Tasas de recubrimiento relativamente bajas.
- Pobre poder de penetración sin manipulación de componentes.

Implantación iónica

Descripción del proceso.- La implantación iónica implica el bombardeo de un material sólido con átomos ionizados de media a alta energía y ofrece la capacidad de alear prácticamente cualquier especie elemental en la región cercana a la superficie de cualquier sustrato. La ventaja de este proceso es que produce mejores propiedades de superficie sin las limitaciones de cambios

dimensionales o delaminación que se encuentran en revestimientos convencionales.

Aplicaciones.- En el caso de los aceros, la aplicación más común de la implantación iónica son los aceros para herramientas con implantación de nitrógeno utilizados para formar y cortar herramientas. La implantación de titanio más carbono también ha demostrado ser beneficiosa para los aceros para herramientas. 25

Ventajas:

- Produce aleaciones de superficie independientes de los criterios termodinámicos.
- No hay problemas de laminación.
- Sin cambios dimensionales significativos.
- Procesamiento a temperatura ambiente posible.
- Mejorar las propiedades de la superficie mientras se retiene propiedades a granel.
- Alto grado de control y reproducibilidad.

Desventajas:

- Capa tratada muy fina (1 µm o menos).
- Proceso de alto vacío.
- Proceso de línea de visión.
- Las concentraciones de aleación dependen de la pulverización.
- Proceso relativamente costoso; formación intensiva necesaria, en comparación con otros procesos de tratamiento de superficies.
- Instalaciones comerciales de tratamiento limitadas disponibles.

Procesamiento de superficie con láser

Descripción del proceso.- El procesamiento de superficie láser implica la fusión de una superficie con un láser, con o sin adiciones de superficie. Con la fusión de superficie por láser, la fusión y el enfriamiento controlado se combinan para refinar la microestructura o para producir una estructura amorfa (o casi amorfa). No se añade material externo durante este proceso. La composición y las propiedades de la superficie también pueden ser modificadas por adición de material externo mediante inyección de polvo o alimentación de alambre. El material externo también se puede colocar en la superficie por deposición de polvo, galvanoplastia,

deposición de vapor, o pulverización térmica, luego incorporado por escaneo láser.

La naturaleza de incorporar material en la superficie modificada varía en función de los parámetros de procesamiento láser, como la densidad de energía y la velocidad transversal. Las capas de superficie de aleación, revestidas y compuestas pueden formarse de esta manera.

Aplicaciones.- Aunque el procesamiento de superficies con láser no ha alcanzado un significado comercial para los aceros, varios aceros al carbono y de baja aleación, aceros para herramientas y aceros inoxidables han sido procesados con láser con diversos grados de éxito. 26-27

Ventajas:

- No es posible procesar rápidamente nuevas estructuras en la región de la superficie con procesamiento convencional.
- Para revestimientos con láser, bajas tasas de dilución de metal soldado y distorsión, en comparación con métodos de soldadura por arco.

Desventajas:

- Alto capital de costo de equipos.
- Algunos materiales de sustrato no son compatibles con los requisitos de conducción térmica por láser.

CONSIDERACIONES IMPORTANTES PARA LA SELECCIÓN DEL PROCESO DEL ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

Requisitos de rendimiento

La clave para una correcta selección de las técnicas de endurecimiento superficial es la identificación de los requisitos de rendimiento para un sistema de material modificado de superficie dado en una aplicación dada. No sólo deben considerarse las propiedades de la superficie, sino también las propiedades del sustrato y la interfaz entre la superficie y el sustrato. En algunos sistemas hay un cambio gradual en las propiedades entre la superficie y el interior, como, por ejemplo, en los componentes nitrurados y carburizados, mientras que en otros hay un cambio abrupto, como, por ejemplo, para las piezas donde un recubrimiento de vapor de nitruro de titanio ha sido depositado en acero. Estas características de la

interfaz pueden influir significativamente en el rendimiento de un sistema de superficie modificada.

Los requisitos de rendimiento de los sistemas de superficie modificada pueden variar ampliamente. Por ejemplo, los sistemas de cargas muy pesadas, como los rodamientos y los engranajes, requieren recubrimientos profundos para resistir el contacto de rodadura y los esfuerzos de flexión que resultan en daños por fatiga. Otras aplicaciones pueden requerir sólo películas de superficie muy delgada para resistir la abrasión cercana a la superficie, el rayado o para reducir la fricción entre superficies móviles. Muchos de estos requisitos se basan en interacciones complejas entre los estados de esfuerzo estático y cíclicos aplicados y los gradientes en las estructuras y propiedades de los sistemas de superficie modificada. 1, 26

Limitaciones de diseño

Las limitaciones del diseño de los componentes incluyen la consideración del tamaño y la forma del componente, ya que pueden afectar a las capacidades del proceso de tratamiento de superficies. ¿Encajará el componente en el equipo de recubrimiento? ¿Puede utilizarse un proceso de visión? ¿Los pequeños agujeros o canales requieren un proceso con un alto poder de lanzamiento? ¿Qué tipo de enmascaramiento será necesario para evitar el recubrimiento de áreas no deseadas? ¿Es compatible la temperatura requerida por el tratamiento de superficie con las limitaciones de temperatura del material componente? ¿Qué tipo de tratamiento posterior al recubrimiento, incluyendo el tratamiento térmico y el acabado, será necesario? 1, 26

Análisis económico

La cuestión económica de importancia fundamental es un análisis costo-beneficio. Este análisis debe basarse en los costes del ciclo de vida completo del tratamiento de superficies, incluidos los costes del proceso (preparación, aplicación, acabado, control de calidad, eliminación de residuos), los costes de utilización y los beneficios (productividad de los componentes recubiertos) y valor añadido de cualquier producto producido o tratado. Otros factores económicos los factores que deben considerarse incluyen la disponibilidad del proceso, el número de componentes a tratar, los requisitos de control de calidad, los calendarios de entrega, etc. Tener en cuenta que el análisis no debe basarse únicamente en el coste inicial del tratamiento de la superficie. Los costes del ciclo de

vida son tan importantes al comparar el coste de varios tratamientos de superficiales como al comparar un tratamiento de superficie con una superficie no tratada.

COMPARACIÓN DE PROCESOS

Dureza contra resistencia al desgaste

Los procesos de desgaste que normalmente se mitigan mediante el uso de superficies duras son la abrasión de baja tensión, el desgaste en sistemas que implican el deslizamiento relativo de sólidos conformes, desgaste preocupante, irritación y, en cierta medida, erosión de partículas sólidas. Desafortunadamente, hay muchas advertencias a esta declaración, y la selección de sustrato/revestimiento debe ser cuidadosamente estudiado, con pruebas adecuadas realizadas si necesario. Los proveedores de recubrimiento también deben ser consultados.

La Figura 1 muestra los rangos típicos de dureza de muchos de los procesos de ingeniería de superficies utilizados para controlar el desgaste. Todos los tratamientos mostrados en esta figura tienen valores de dureza mayores que el acero convencional de construcción o el acero de bajo carbono. Los procesos de endurecimiento superficial que dependen de transformaciones martensíticas tienen una dureza comparable, y los tratamientos de difusión que producen superficies más duras son nitruración, borurización (borurado) y cromización. El revestimiento de metal más duro es el cromado, aunque el enchapado de níquel endurecido sin electrodo puede alcanzar valores justo por debajo de la del cromado. Las superficies que superan la dureza del cromo son los cermets o cerámica o superficies que se modifican para que sean cermets o cerámica. Estos incluyen nitruros, carburos, boruros, y compuestos similares. 1, 26

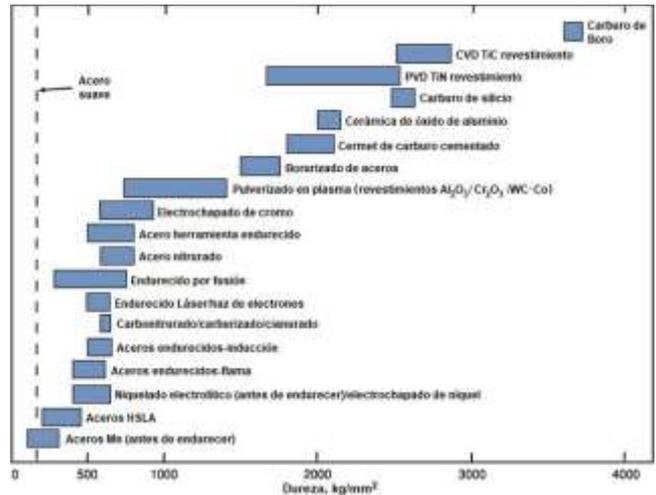


Figura 1. Rangos de niveles de dureza para diversos materiales y tratamientos superficiales. HSLA: Alta-resistencia de baja-aleación.

Fuente: (Elaboración propia.)

Las cerámicas sólidas populares utilizadas para aplicaciones de desgaste son el óxido de aluminio, carburo de silicio, nitruro de silicio y generalmente tienen durezas en el rango de 2000 a 3000 kg/mm². Como se mostró en la Figura 1 cuando materiales como el óxido de aluminio se aplican por pulverización de plasma u otro proceso de pulverización térmica, tienen durezas que son menores que el mismo material en forma sólida prensada y sinterizada. Esto se debe a que los materiales pulverizados contienen porosidad y óxidos que no están contenidos en la forma sólida sinterizada.

Costo

El costo debe compararse con el rendimiento requerido para el sistema de tratamiento de superficies. Un tratamiento superficial de bajo costo que no realiza su función es un gasto desperdiciado. Desafortunadamente, es casi imposible dar costos comparativos absolutos para diferentes opciones en la ingeniería de superficies. A menudo, se ofrece una gama de precios para un trabajo en particular de diferentes proveedores candidatos igualmente competentes. Probablemente el factor más importante que se relaciona con los costos de producir una superficie resistente al desgaste en una pieza es la cantidad de la pieza. El tratamiento de muchas piezas generalmente permite economías en el tratamiento y el acabado.

Otra consideración al evaluar los costos de tratamiento de superficie es el tamaño de la pieza. Hay algunos tamaños críticos para cada proceso de tratamiento superficial por encima del cual el costo de obtener el

tratamiento puede ser alto. Una serie de tratamientos superficiales requieren que la pieza encaje en la zona de trabajo de una cámara de vacío. El costo del equipo de vacío aumenta exponencialmente con el volumen de la cámara. 1, 26

Otros factores para ser considerados son:

- El tiempo necesario para un tratamiento de superficie dado.
- Fijación, enmascaramiento y costes de inspección.
- Gastos de acabado final.
- Costos de material.
- Costos de energía.
- Costos laborales.
- Costes relacionados con el medio ambiente, por ejemplo, eliminación de soluciones de chapado.
- Vida útil prevista del revestimiento.

Debido a estos diversos factores, es difícil comparar los costos con un alto grado de precisión. En la Figura 2 se presentan algunas directrices generales para la comparación de costos.

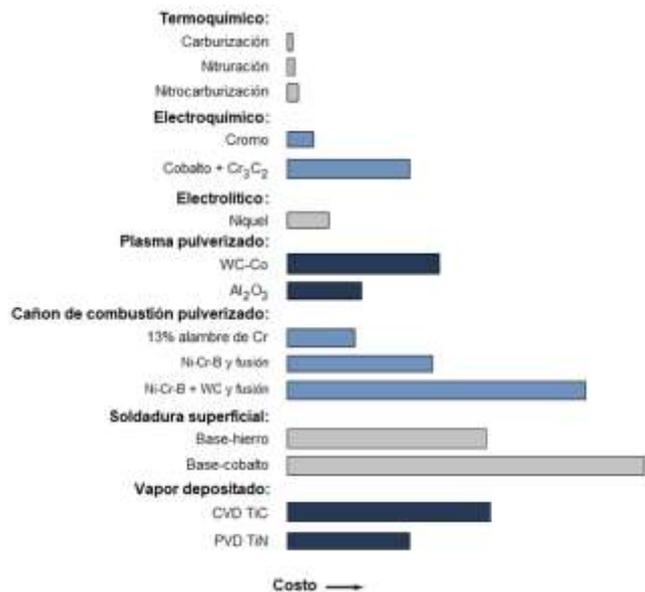


Figura 2. Aproximación de costos relativos de varios tratamientos superficiales. Fuente: (Elaboración propia)

Distorsión o cambio de tamaño

La Figura 3. muestra las temperaturas superficiales que se encuentran en diversos procesos de ingeniería de superficies. Como se indica en la figura, los procesos se

clasifican en dos grupos: un grupo produce una distorsión insignificante de la pieza, y el otro grupo contiene procesos que tienen un potencial variable de causar distorsión. Obviamente, si una pieza puede beneficiarse de un tratamiento superficial pero no se puede tolerar la distorsión, se deben considerar procesos que requieran un calentamiento mínimo.

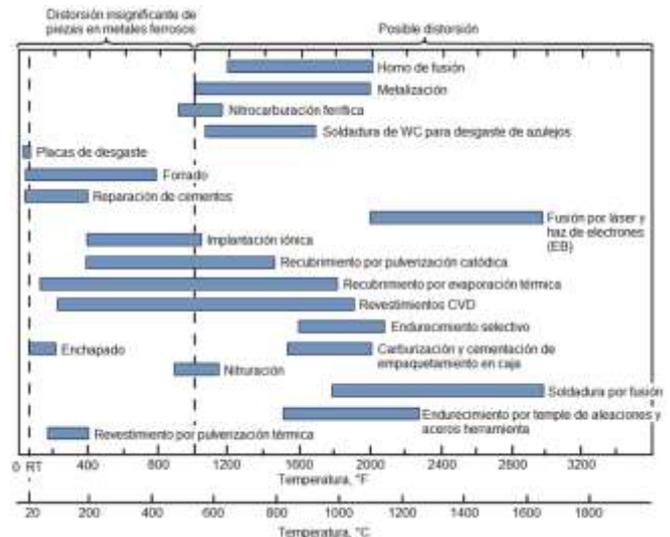


Figura 3. Temperaturas máximas de superficie que se pueden anticipar para varios procesos de ingeniería de superficies. La línea vertical discontinua a 540°C (1000°F) representa el límite de temperatura de distorsión para metales ferrosos.

Fuente: (Elaboración propia)

Significativamente, una temperatura de 540°C (1000°F) fundiría una cantidad de metales no-ferrosos y causaría distorsión en metales como el aluminio o el magnesio. Sin embargo, la Figura 3 anterior muestra las temperaturas de los procesos que se pueden utilizar para comparar el calentamiento que se requerirá para un proceso en particular. 1, 26

Espesor de revestimiento alcanzable

La Figura 4 muestra las capacidades típicas de espesor-penetración de varios revestimientos y tratamientos superficiales. Como se indica en la figura, algunos tratamientos de ingeniería de superficies penetran en la superficie y no hay acumulación intencional en la superficie. Otros tratamientos de superficie cubren o acumulan intencionalmente la superficie. Este es un factor de selección. ¿Puede una pieza tolerar una acumulación en la superficie? si no, el proceso de selección se limita a los tratamientos que penetran en la

superficie. Otros factores que afectan al espesor de un tratamiento de superficie determinado son los requisitos dimensionales, las condiciones de servicio, la corrosión o la profundidad de desgaste prevista/permisible, y las cargas previstas en la superficie. 1, 25, 26

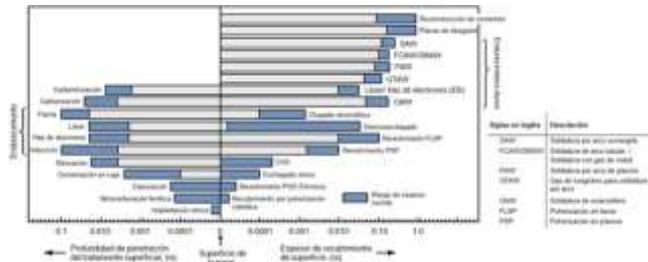


Figura 4. Espesores y profundidades típicas de penetración de revestimientos para varios procesos de recubrimiento y endurecimientos superficiales.

Fuente: (Elaboración propia)

Conclusiones

Este trabajo se hizo una descripción de los principales tratamientos termoquímicos. Aunque la idea de los tratamientos termoquímicos se originó a principios del siglo XX, sigue siendo un tema de investigación científica con gran auge. A nivel comercial, existe una mejora continua de los sistemas existentes, la expansión a tratamientos novedosos y la búsqueda de aplicaciones únicas. Por ejemplo, la combinación de tratamientos termoquímicos conocidos como híbridos convencionales, ha tomado mucha relevancia científica. En la práctica, una selección de la técnica óptima depende del tamaño del componente, la geometría, la química del material, la aplicación y la economía del proceso. En los últimos años, el aspecto ambiental ha ganado gran importancia, ya que la implementación de un tratamiento termoquímico amigable con el medio ambiente es fundamental.

Agradecimientos

El trabajo descrito en el presente artículo fue financiado por la beca otorgada por PROMEP. Asimismo, le agradezco al **Dr. Jorge Zuno Silva**, quien es *Director de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún-UAEH*, México, por todas las facilidades para concluir este trabajo de investigación.

Referencias

- [1] Davis, J. R. (2002) Surface Hardening of Steels: Understanding the basics. OHIO: ASM International.
- [2] Lampman, S. (1991). Introduction to Surface Hardening of Steels. In Heat Treating (Vol. 4, pp. 259-267). ASM Handbook.
- [3] Díaz del Castillo, F. (2007). Endurecimiento superficial del acero. In Lecturas de ingeniería (Vol. 1, p. 48). Ciudad de México, México: FES-Cuautitlán.
- [4] Judith C. Chow, Jian Zhen Yu, John G. Watson, Steven Sai Hang Ho, Theresa L. Bohannon, Michael D. Hays & Kochy K. Fung (2007) The application of thermal methods for determining chemical composition of carbonaceous aerosols: A review, Journal of Environmental Science and Health, Part A, 42:11, 1521-1541, DOI: 10.1080/10934520701513365
- [5] Zhen-Yu Xi, You-Yi Xu, Li-Ping Zhu, Yue Wang, Bao-Ku Zhu, A facile method of surface modification for hydrophobic polymer membranes based on the adhesive behavior of poly(DOPA) and poly(dopamine), Journal of Membrane Science, 327 (2009) 1–2, P. 244-253.
- [6] Budiniski, K. G. (1988). Surface Engineering for Wear Resistance. Prentice-Hall.
- [7] Amelse, J. A., Butt, J. B., Schwartz, L. H., Carburization of supported iron synthesis catalysts, The Journal of Physical Chemistry, 82 (1978) 5: 558-563. <https://doi.org/10.1021/j100494a012>
- [8] S. Geng, W. Ding, S. Guo, X. Zou, Y. Zhang, X. Lu. (2015) Carbon deposition on iron surfaces in CO–CO₂ atmosphere. *Ironmaking & Steelmaking* 42:9, pages 714-720.
- [9] Tong, W. P., Tao, N. R., Wang, Z. B., Lu, J., Lu, K., Nitriding Iron at Lower Temperatures, Science, 299 (2003) 686-688, <http://science.sciencemag.org/content/299/5607/686.abstract>
- [10] Hudis, M., Study of ion-nitriding, Journal of Applied Physics, 44 (1973) 1489-1496, <https://doi.org/10.1063/1.1662398>
- [11] E. Bezerra de Menezes Netto, Madeira Kliauga, A., Plaut, R., & Padilha, A. (2003). Liquid, gaseous and plasma nitrocarburizing using three different stainless steel types as a substrate (austenite, ferritic and duplex): A comparative study. *Revue De Métallurgie*, 100(1), 83-91. doi:10.1051/metal:2003149
- [12] K. Genel, Boriding kinetics of H13 steel, Vacuum, 80 (2006) 5, Pages 451-457, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.07.013>
- [13] K. Genel, I. Ozbek, C. Bindal, Kinetics of boriding of AISI W1 steel, Materials Science and Engineering: A, 347 (2003) 1–2, Pages 311-314, [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00607-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00607-X).
- [14] J. Campos, J. Oseguera, U. Figueroa, J.A García, O. Bautista, G. Kelemenis, Kinetic study of boron diffusion in the paste-boriding process, Materials Science and Engineering: A, 352 (2003) 261-265, [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00910-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00910-3).
- [15] Graf von Matuschka, A. (1980). *Boronizing*, Munich: Carl Hanser Verlag
- [16] Sinha, A. K. Boriding (Boronizing). En *ASM Handbook (Vol. 4)* (1991) (pp. 437 – 447). Ohio: ASM International.
- [17] Gopalakrishnan, A., K.K. Lal and A.G. Ponniah, 1999. Conservation of the Nilgiri rainbow trout in India. *Naga, ICLARM Q.* 22(3):16-19.
- [18] Sørensen, Mads R., Jacobsen, Karsten W., Jónsson, Hannes, Thermal Diffusion Processes in Metal-Tip-Surface Interactions: Contact Formation and Adatom Mobility, Physical Review Letters, 77 (1996) 5067-5070.
- [19] Eyre, T. S. (1975). Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals *Wear*, 34(3), 383-397.
- [20] Singhal, S. C. (1977). A hard diffusion boride coating for ferrous materials. *Thin Solid Films*, 45,

- [21]V. Y. Skeebea et al., "Numerical Modeling of Steel Surface Hardening in the Process of High Energy Heating by High Frequency Currents", *Applied Mechanics and Materials*, 698 (2015) pp. 288-293.
- [22]N.Y. Sari, M. Yilmaz, Investigation of abrasive+erosive wear behaviour of surface hardening methods applied to AISI 1050 steel, *Materials & Design*, 27 (2006) pp. 470-478, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.11.020>.
- [23]Zenker, R., & Mueller, M. (1988). Electron Beam Hardening, Part I, Principles, Process Technology and Properties. In *Heat Treat. Met.* (Vol. 15, pp. 79-88).
- [24]Zenker, R., John, W., Rathjen, D., & Fritsche, G. (1989). Electron Beam Hardening, Part 2, Influence on Microstructure and Properties. In *Heat Treat. Met.* (Vol. 16, pp. 43-51).
- [25]Krauss, G. (1992). Advanced Surface Modification of Steels. *Journal of Heat Treating*, 9(2), 81-89.
- [26]Davis, J.R., (2001), *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, ASM International, US
- [27]Robert B. Heimann, Thermal spraying of biomaterials, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2006) pp. 2012-2019, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.052>
- [28]J.C Tan, L Looney, M.S.J Hashmi, Component repair using HVOF thermal spraying, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93 (1999) pp. 203-208, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00113-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00113-2).
- [29]Frigaard, Ø., Grong, Ø. & Midling, O.T. *Metall and Mat Trans A* (2001) 32: 1189. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0128-4>
- [30]Jae-Hyung Cho, Donald E. Boyce, Paul R. Dawson, Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 398 (2005), pp. 146-163, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.002>.
- [31]O. O. Diniz Neto, R. Vilar, Physical-computational model to describe the interaction between a laser beam and a powder jet in laser surface processing, *Journal of Laser Applications*, 14 (2002) pp 46-51, <https://lia.scitation.org/doi/abs/10.2351/1.1436485>
- [32]J.G. Smeggil, A.W. Funkenbusch, N.S. Bornstein, The effects of laser surface processing on the thermally grown oxide scale formed on a Ni-Cr-Al-Y composition, *Thin Solid Films*, 119 (1984) pp. 327-335, [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(84\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0040-6090(84)90016-6).