

Implantación iónica.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de encontrar materiales capaces de trabajar en condiciones cada vez mas extremas y agresivas (desgaste, corrosión, oxidación, fatiga) ha hecho que desde comienzos de los 80 se hayan desarrollado toda una serie de técnicas de modificación superficial encaminadas a obtener nuevos materiales en superficie, con propiedades diferentes a las del material base o imposibles de obtener por métodos tradicionales. Entre estas técnicas destaca la implantación iónica, que consiste en la aceleración y proyección de iones contra una superficie. Gracias a la energía cinética del ion, éste penetra en la red cristalina produciendo una alteración superficial en el comportamiento mecánico y químico, así como también en las propiedades eléctricas, ó

ópticas e, incluso, magnéticas.

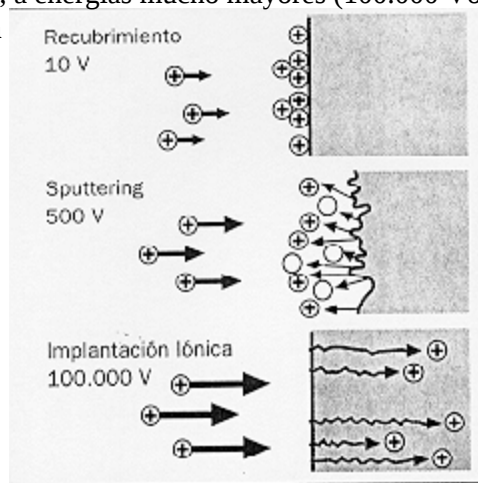
Desde el punto de vista químico, las superficies modificadas pueden desarrollar una serie de mecanismos protectores – por modificación en las propiedades de adherencia de los óxidos formados o por formación de capas pasivas– que prolongan la vida en servicio de los materiales metálicos tanto frente a la corrosión electroquímica como a la originada por altas temperaturas.

Al ser un tratamiento especial, tiene sus nichos de aplicación concretos, en el utillaje y herramientas que trabajando en frío (por debajo de 500°C) existe una problemática de adhesión, abrasión y corrosión del material trabajado. Un ejemplo son las boquillas de inyección y postizos de moldes en la Industria Transformadora del Plástico.

Fundamento de la implantación iónica, Bombardeo iónico

Un creciente número de tratamientos avanzados están basados en el bombardeo iónico. Los iones no son otra cosa que átomos cargados eléctricamente, normalmente mediante el arranque de uno de sus electrones. Esto es necesario para poder acelerarlos y localizarlos mediante campos eléctricos y magnéticos.

Dependiendo de la energía con la que estos átomos llegan a una superficie se pueden dar tres procesos diferentes: Si la energía es muy baja (10 Voltios de aceleración) los átomos se depositan en superficie, creándose un recubrimiento. Si la aceleración es mayor (500 Voltios) predomina un proceso de pulverización de la superficie conocido como Sputtering. Puede ser útil para limpieza superficial o para evaporar materiales para recubrimientos. Finalmente, a energías mucho mayores (100.000 Voltios), los átomos penetran dentro de la superficie incrustándose a una



profundidad de muchas capas atómicas (Fig. 1). Por ejemplo, los iones de Nitrógeno acelerados con 100.000 Voltios se mueven en el vacío a una velocidad de 1.170 Km/s y al chocar contra una superficie de Acero se

incrustan alcanzando profundidades de hasta 0,2 micras. Este es el proceso que conocemos como implantación iónica.

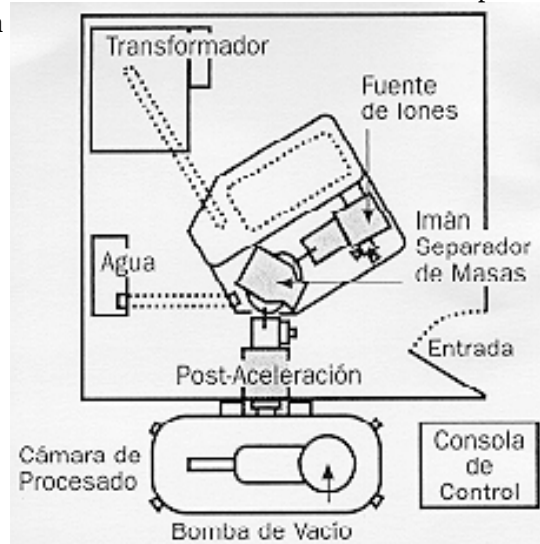
Fig. 1. Efectos del bombardeo cónico dependiendo de la energía.

EQUIPOS INDUSTRIALES

Las dos aplicaciones industriales más importantes de la implantación iónica son el dopado de semiconductores y el tratamiento de superficies metálicas. La primera aplicación se desarrolló en los años 60 y es ya completamente industrial de manera que las compañías microelectrónicas disponen de equipos automáticos para la implantación en serie de las obleas de Silicio con las que se fabrican los chips.

La implantación de superficies metálicas, para ser eficaz, requiere dosis de iones mil veces superiores a las empleadas en microelectrónica. Esto explica que su industrialización ha tenido que esperar al desarrollo de equipos mil veces más potentes, algo que es una realidad desde principios de los años 80.

Un equipo de implantación iónica (Fig. 2) consta de una serie de elementos característicos que son: a) Una fuente de iones (un dispositivo capaz de producir cantidades suficientes de determinados tipos de iones). b) Una o dos etapas de aceleración y focalización (diferencias de potencial del orden de 100.000V). e) Un imán separador de masas (potente electroimán capaz de separar unos elementos de otros según su masa atómica). d) Una cámara de tratamiento (Cámara de alto vacío donde se colocan las piezas cuya superficie hay que tratar, normalmente provista de algún



sistema de manipulación para orientar y mover las piezas durante el tratamiento). El alto vacío (10^{-6} mbar) es una característica de los equipos de implantación iónica, requiriéndose potentes bombas y tiempos muertos al cargar y descargar la cámara, y un sistema de manipulación de blancos.

La mayor parte de los equipos industriales son muy versátiles, capaces de implantar prácticamente todos los elementos del sistema periódico. Esto hace que sean comparativamente más costosos que si estuvieran diseñados para una aplicación específica, como es el caso de los empleados en microelectrónica.

La práctica totalidad de las fuentes de iones existentes en la actualidad producen y aceleran iones positivos, aunque en los últimos años se ha despertado un cierto interés por la producción de haces de iones negativos. La creación de un ion positivo supone el arranque de uno o más electrones de la corteza de un átomo. La forma de conseguir esto suele ser mediante el bombardeo de un sólido o un gas con algún otro tipo de partícula (electrones, otros iones) o mediante excitación electromagnética. Un dispositivo muy común, base de las fuentes Freeman, Kaufmalm etc., consiste en un filamento de Tungsteno que, calentado al rojo por una corriente eléctrica, emite electrones por efecto termoiónico. Estos electrones, acelerados por un campo eléctrico, ionizan los átomos y moléculas del gas residual circundante (el proceso debe realizarse en vacío),

produciéndose un plasma del que es posible extraer una corriente de iones positivos.

Habiendo tomado las correspondientes disposiciones, la corriente iónica así producida contendrá una cantidad predominante del ion que nos interesa, pero contendrá también otros iones. La manera estándar de purificar este haz consiste en hacerlo pasar a través de un campo magnético variable para separar las distintas especies iónicas por masas atómicas.

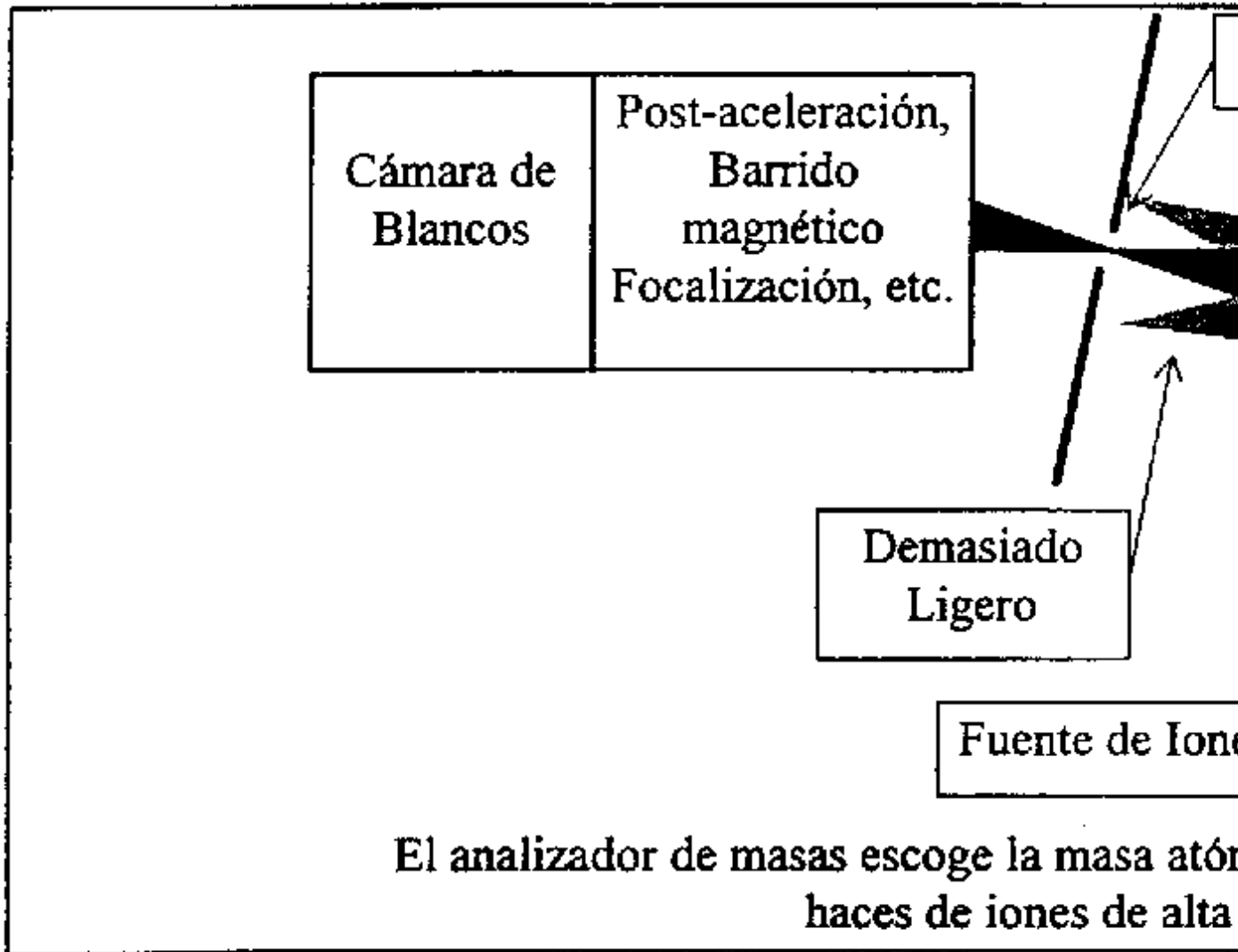
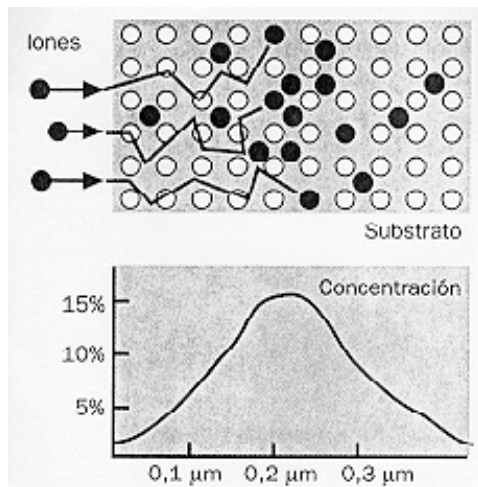


Figura 4: Purificación del haz de iones por medio de un imán

Todo el proceso de generación, aceleración e implantación se realiza en alto vacío, del orden de 10^{-5} a 10^{-6} mbar. Si no fuera así, las trayectorias de los iones serían excesivamente cortas. Al nivel de vacío citado, las trayectorias medias superan varios metros.

SUPERFICIES IMPLANTADAS

El proceso de implantación iónica consiste en la creación del haz de iones, su aceleración hasta la energía prevista (normalmente 100 – 200 keV), su purificación y focalización, mediante electroimanes, y su impacto en las zonas de la superficie que se desean proteger.



La implantación iónica produce en las superficies cambios de composición y estructura que son el origen de su **aumento de resistencia al desgaste, fricción y corrosión**.

Los iones implantados se distribuyen en una profundidad que oscila entre 200 y 2000 capas atómicas (0.05 μm a 0.5 μm) dependiendo del tipo de ion, del material base y de la energía del bombardeo. El máximo de concentración, que para los iones ligeros como Carbono o Nitrógeno puede superar el 50%, se sitúa a una cierta profundidad y luego disminuye suavemente. No hay pues una intercara abrupta entre la zona implantada y el material base (Fig. 3). En cuanto a la profundidad, muy reducida si se la compara con la de tratamientos convencionales, hay que decir que es la adecuada para producir los cambios que se desean producir. No interesa profundizar más.

Las superficies implantadas con iones tipo Boro, Carbono, Nitrógeno etc. se endurecen como consecuencia de la formación de finos precipitados (Nitruros, etc). También la introducción de dosis elevadas de estos elementos crea esfuerzos compresivos importantes que contribuyen al bloqueo de microgrietas y al cierre de los canales de corrosión. La capa de óxido superficial presente en muchos metales puede cohesionarse contribuyendo también a una mejor protección contra la corrosión y a una reducción de los coeficientes de fricción. Por su parte la implantación de iones metálicos tiene efectos muy diversos: Por ejemplo el Titanio, en combinación con el Carbono, produce una drástica reducción del coeficiente de fricción cosa que también la logra el Molibdeno en combinación con el Azufre. La implantación de Cromo consigue formar capas de óxido muy coherentes que protegen las superficies contra corrosión y desgaste.

En resumen: siendo tres los parámetros que caracterizan cada implantación (**tipo de ion, energía de implantación y dosis implantada**) hay distintas recetas para los distintos problemas, aunque en el caso de los aceros, que es el material más tratado, las implantaciones de Nitrógeno, seguidas de las de Cromo, Carbono o Titanio constituyen el 90% de las soluciones empleadas.

Efectos de la implantación iónica de una superficie

Efectos balísticos

A grandes rasgos, la penetración media de un ion dentro de un sólido dependerá de la densidad de este, de la energía del proyectil y de las masas atómicas del blanco y del proyectil. A las energías típicas de la implantación iónica (<200 keV) ni siquiera la implantación de Hidrógeno en materiales ligeros como el Silicio supera las 2 micras. El orden de magnitud típico de una implantación iónica es la décima de micra.

El proceso de frenado es aleatorio. Así pues los átomos implantados se distribuirán en profundidad siguiendo algún tipo de distribución estadística que podemos aproximar a una gaussiana (Figura 5). A dosis bajas, apenas habrá átomos en superficie, mientras que habrá un pico de concentración a una determinada profundidad y a partir de ahí decrecerá hasta extinguirse. La implantación de iones a distintas energías permite construir

perfiles de implantación planos etc.

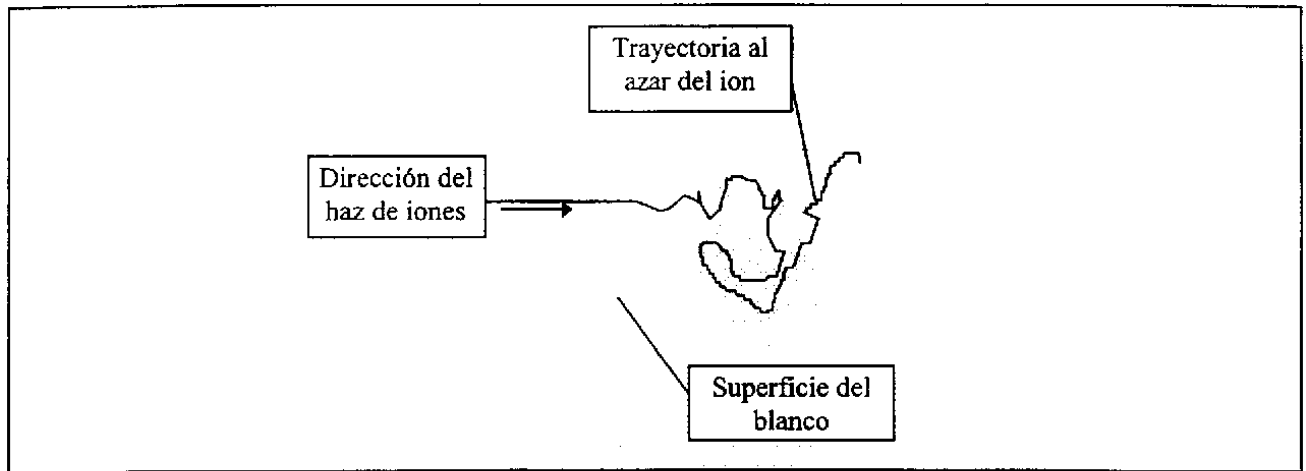


Figura 5: Trayectoria al azar de un ion implantado

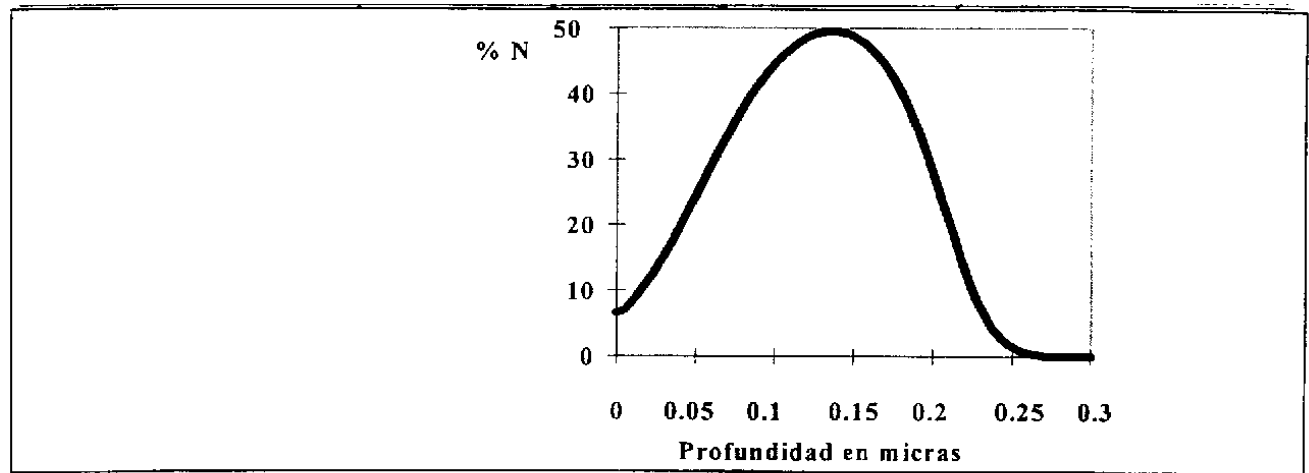


Figura 6: Perfil de implantación de Nitrógeno en un Acero.

La implantación de iones produce también un efecto de sputtering de la superficie que es mas importante cuanto mayor es la masa del proyectil. Si a medida que implantamos vamos arrancando material de la superficie, es posible llegar a una situación de saturación en la que el pico de implantación se sitúa en superficie y a partir de ahí no puede aumentarse la dosis retenida. Para iones pesados la dosis de saturación puede ser muy baja.

Los efectos balísticos de la implantación iónica en el seno de los sólidos son muy variados: creación de vacantes y de intersticiales, ionización de los átomos de la red, etc. En general, y con mayor importancia para iones pesados, el ion incidente comunica gran parte de su energía a átomos de la red, desplazandolos a gran velocidad e iniciando cascadas de iones secundarios.

Efectos químicos y estructurales

Si bien los efectos balísticos pueden predecirse a partir de modelos teóricos muy ajustados, la modificación química y estructural del material debe ser caracterizada a posteriori y hoy por hoy se sigue prediciendo a partir de la experiencia.

La implantación produce en primer lugar efectos químicos en el sentido de cambios de composición y formación de nuevas aleaciones o compuestos. En este sentido la implantación iónica crea nuevos materiales

en la superficie de partida. Al ser un proceso fuera del equilibrio es posible crear aleaciones metaestables, por encima de los límites de solubilidad. También, en el caso de la implantación de elementos reactivos como B, C, N, O etc. se produce la formación de Boruros, Carburos, Nitruros, Óxidos etc., normalmente en forma de precipitados finos y dispersos, que tienen bastante que ver con los cambios de dureza superficial observados.

De alguna manera, la implantación iónica es una nueva forma de hacer química, y como en otros procesos químicos hay que tener cuidado con las perturbaciones producidas por la presencia de otros elementos. Por ejemplo, el Carbono, presente en la mayor parte de los sistemas, puede formarse en superficie una capa fina de Carbono amorfo durante la implantación de otros elementos. Esta capa contribuiría a reducir los coeficientes de fricción o a la pasivación química del material. El Oxígeno, también omnipresente, puede formar en superficie una capa de óxido con el ion implantado o con elementos del sustrato. Esta capa de óxido, normalmente fina y coherente, puede también contribuir a la modificación de los coeficientes de fricción o a la pasivación del material frente a ataques químicos. Estos efectos, normalmente no provocados, pueden llegar a ser tan interesantes que se han ideado métodos para producirlos controladamente. Además la formación dinámica de estas capas en superficie puede ser un método adecuado para incrementar las dosis de saturación de ciertos elementos, ya que siendo pulverizadas por sputtering en lugar de la verdadera superficie del material, se vuelven a crear en un proceso continuo, haciendo el papel de una capa de sacrificio que no se consume.

Pero además de los efectos químicos están también los efectos estructurales, como la amortización de las capas superficiales, la formación de precipitados endurecedores o la creación de tensiones compresivas que aumentan la elasticidad superficial y bloquean el crecimiento de las microgrietas, con lo que trabajan mejor a fatiga.

Los efectos tribológicos (referentes al rozamiento entre los cuerpos) de una implantación iónica dependen muchas veces de una combinación de efectos químicos y estructurales, y hay que admitir que no siempre se tiene una explicación definitiva de los cambios de comportamiento observados, cosa que no es extraña si se admite también que la tribología (Ciencia que estudia el rozamiento entre cuerpos) está todavía desarrollando sus esquemas teóricos.

APLICACIONES

Los problemas típicos que se resuelven por implantación iónica son los de **desgaste adhesivo, desgaste abrasivo no muy severo, fricción y determinados tipos de corrosión u oxidación**. La mayor parte de los materiales tratados son aceros aunque las aleaciones de Aluminio o de Titanio responden todavía mejor, siendo muy interesantes también los resultados sobre metal duro, capas de Cromo o recubrimientos de TiN. Hay también una serie de aplicaciones en desarrollo sobre vidrio, cerámicas y polímeros.

Dos ejemplos concretos de aplicación industrial lo constituyen:

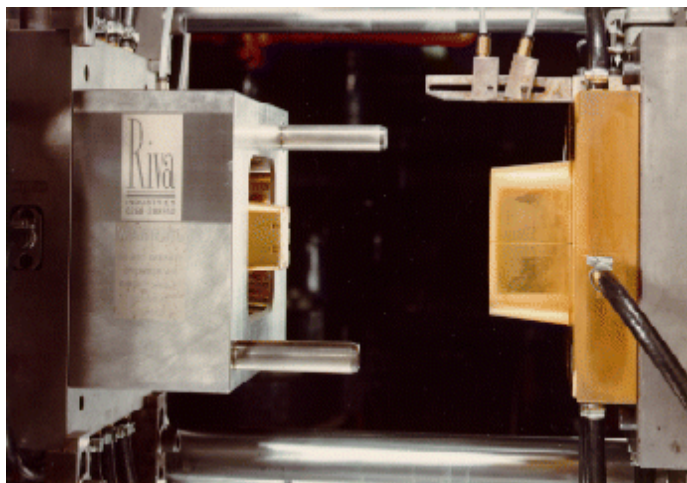


Fig. 4. Molde de inyección de plástico. Fig. 5. Troqueles para envases metálicos.

Aunque los ámbitos en los que se ha empleado la implantación iónica son muy numerosos y todavía se siguen identificando nuevas aplicaciones, el 90% de los casos tratados por empresas y centros de subcontratación corresponden a una serie de problemas típicos donde la implantación iónica es la solución mas adecuada desde los puntos de vista técnico y económico. Conviene citar los mas conocidos:

A- Moldes de Inyección de plástico: Aumentos de vida útil de hasta 4 veces mediante la implantación de Cromo para problemas de desgaste con corrosión, o hasta de 9 veces mediante la implantación de Nitrógeno para el desgaste por inyección de plásticos cargados.

Esta es una de las aplicaciones mas extendidas en Europa, con especial incidencia en Dinamarca y en el Reino Unido. Moldes de inyección de plástico para juguería de precisión, aparallaje eléctrico, Compact Discs, objetos ornamentales y objetos de series largas son los escenarios más habituales para la aplicación de la implantación iónica.

La implantación iónica proporciona especial protección a los orificios y canales de entrada del plástico (puede aplicarse restrictivamente), así como a las superficies con texturas o pulidos especiales cuyo deterioro invalida al molde.

B- Útiles para fabricación de envases metálicos: Aumentos de hasta 5 veces mediante implantación de Nitrógeno en troqueles, punzones y matrices. Es otra de las aplicaciones mas extendidas en Dinamarca y en España.

C- Prótesis de cadera o rodilla: Aumentos de vida de mas de 10 veces en prótesis de aleación Ti6Al4V. Esta es la aplicación mas extendida en USA.

D- Cuchillas y otros útiles para corte de papel: Aumentos de vida de 3 a 10 veces mediante la implantación de Nitrógeno en el borde de corte. En ocasiones el tratamiento sigue siendo eficaz después del reafilado.

E- Punzones, troqueles, matrices y útiles para estampación, deformación de chapa o conformado de tubos: Solución de problemas de fricción, en ocasiones prescindiendo de lubricantes. Aumentos de vida de 4 a 8 veces.

F- Cuchillas, extrusores, rodillos y otros útiles empleados en la industria alimentaría: Aumento de resistencia a problemas combinados de desgaste y ataque químico. Aumento de vida muy variable, dependiendo del caso.

Implantación iónica en problemas de desgaste y fricción:

Uno de los primeros datos que promovieron el interés por la implantación iónica de metales fue la constatación de que los Aceros implantados con Nitrógeno, a dosis altas, aumentaban, a veces dramáticamente, su resistencia al desgaste. Este comportamiento se ha descrito, no solo para la mayor parte de los aceros, sino también para otras aleaciones metálicas, especialmente de Aluminio o de Titanio. En todos los casos se atribuye esta mejora a la formación de un precipitado disperso de Nitruros (en el caso de los aceros de Nitruro de Cromo especialmente), aunque a veces pueden colaborar otros fenómenos, como los esfuerzos compresivos que producen una mayor elasticidad superficial etc. Los metales duros (WC-Co cementados) también pueden aumentar su resistencia al desgaste mediante la implantación de Nitrógeno o de ciertos iones metálicos.

El coeficiente de fricción permanece notablemente bajo en aceros implantados con Titanio mas Carbono. Otra solución es la implantación de carbono a dosis tan altas que se forma una capa fina de carbono en superficie. Además, la mayor parte de las implantaciones habituales para la reducción del desgaste tienen también efectos beneficiosos sobre la fricción.

En resumen, la implantación iónica es una herramienta útil para solucionar problemas de desgaste adhesivo (o abrasivo no muy severo), así como problemas de fricción.

Implantación iónica en problemas de corrosión

Así como los problemas de desgaste/fricción se tratan en la practica con no mas de media docena de soluciones, para la variadísima problemática de corrosión se han intentado todo tipo de implantaciones, a veces de iones exóticos o en dosis muy reducidas. No obstante, el caso mas explotado es la implantación de Cromo para evitar el ataque químico por gases corrosivos en moldes de inyección de plástico, así como la constatación de que la implantación de Nitrógeno mejora también la resistencia a la oxidación.

El hecho de que la implantación iónica no sea un tratamiento adecuado a temperaturas altas hace que algunos de los problemas tecnológicos mas candentes (corrosión de superaleaciones en turbinas etc.) estén fuera del alcance de esta técnica.

Implantación iónica para la solución de otros problemas

La mayor parte de las aplicaciones industriales de implantación de metales se centran en el desgaste, fricción y corrosión, pero hay otras situaciones concretas en las que la implantación iónica puede colaborar a mejorar el comportamiento de útiles y componentes. Suelen citarse aumentos en la resistencia a la fatiga, posiblemente debidos al bloqueo de las microgrietas en las superficies implantadas, aumentos en la resistencia a la cavitación etc. Tiene también un interés creciente la implantación de otros material es entre los que se incluyen vidrio s, polímeros (para hacerlos conductores), elastómeros, cerámicas e incluso fibras para materiales compuestos. algunas de las implantaciones que mas interés despiertan en los últimos tiempos se relacionan con la biocompatibilidad o las propiedades bacteriostaticas de materiales que van a estar en contacto prolongado con el cuerpo humano.

AREAS DE APLICACION INDUSTRIAL

Al margen de las aplicaciones en electrónica, la implantación iónica ha encontrado hasta el momento nichos de aplicación en sectores tales como la transformación de plásticos reforzados, el sector mecánico y biomedicina. En las Tablas IV a VI (al final de este apartado) se resumen algunas de las aplicaciones industriales y los resultados obtenidos en estos campos.

Sector de transformación de plásticos reforzados.

La utilización progresiva de los materiales plásticos y compuestos en aplicaciones con exigencias mecánicas o estéticas hace necesaria la modificación de los polímeros base con refuerzos, pigmentos u otros aditivos. Un ejemplo típico de aditivo utilizado en los procesos mas generalizados de transformación de plásticos, como son la inyección y la extrusión, es la fibra de vidrio. El refuerzo con fibra corta de vidrio puede alcanzar unos niveles muy altos de un 30 o 40 % del peso del material. Las adiciones fuertes de fibra en procesos de transformación de termoplásticos y termoendurecibles modifican el comportamiento reológico del plástico fundido y también provocar un desgaste abrasivo de las superficies que se encuentran en contacto con dicho flujo, principalmente en aquellas zonas en que se obstaculiza el desarrollo lineal del mismo.

Otros factores que pueden provocar desgaste en los elementos de la maquinaria son la utilización de pigmentos abrasivos (Ej. TiO_2) para la coloración estética de las piezas, o la utilización de cargas minerales abrasivas, bien para reducir costes, bien para impartir ciertas propiedades a los componentes plásticos (dieléctricas, estabilidad dimensional, fricción reducida, etc.).

Las zonas de desgaste en los procesos de inyección o extrusión afectan principalmente al sistema husillo-cilindro, la boquilla de inyección, los canales de alimentación y el molde propiamente dicho (1°). En el caso del husillo, el desgaste es superior en las zonas de plastificación y de inyección que en la zona de alimentación (véase la Figura). Esto se debe al aumento de presión que sufre el polímero en su avance por el husillo. En consecuencia, el efecto abrasivo será más importante en la zona de la boquilla de inyección, en donde la presión y la importante cizalla que se produce en ese punto origina un desgaste apreciable del material. El desgaste en el propio molde será también importante en las zonas de presión elevada, tales como los bebederos, canales de alimentación y aquellos estrechamientos de la cavidad en donde se produzcan sobrepresiones puntuales, inclusive las zonas de impresiones de la cavidad.

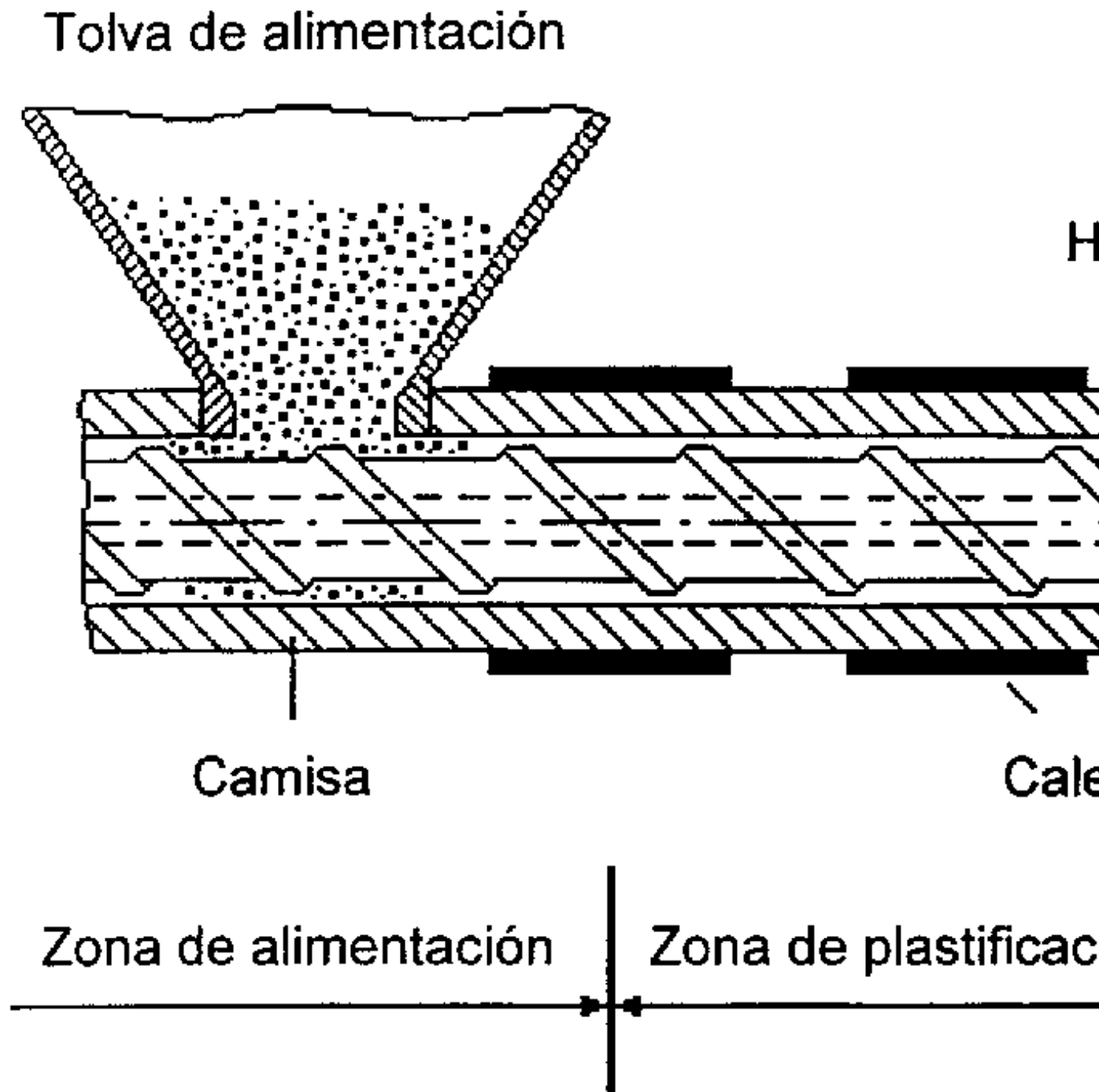


Figura 1. Esquema de una máquina de inyección

La implantación iónica de nitrógeno se utiliza, en consecuencia, frecuentemente sobre la zona de inyección de los husillos, camisas nitruradas previamente, boquillas, bebederos y canales de alimentación y las impresiones de los moldes. Estos moldes pueden ser de acero P20, martensítico inoxidable AISI 420 o bien de acero recubierto con cromoduro. Todos estos materiales, una vez pulidos, han sido implantados con nitrógeno obteniéndose mejoras superiores a 4 veces en la vida del molde

para la producción de piezas de plásticos reforzados con materiales abrasivos.

Adicionalmente, la implantación de nitrógeno parece facilitar el desmoldeo de las piezas sin deteriorar la resistencia a la corrosión de los moldes.

En numerosas circunstancias la impresión del molde posee un texturizado para proporcionar un acabado mate decorativo y funcional a las piezas. El desgaste en el mismo da lugar a zonas brillantes poco estéticas sobre las piezas moldeadas. La implantación de nitrógeno sobre las cavidades texturizadas del molde mejoran de una manera significativa su resistencia al desgaste y su vida en servicio, retrasando de un modo notable la necesidad de un nuevo texturizado.

En el caso del procesamiento de PVC se pueden producir gases corrosivos de ácido clorhídrico producto de la descomposición del polímero, que pueden degradar en las zonas de mayor temperatura el husillo, las paredes del cilindro, boquilla y zonas del molde. En ciertos casos se han implantado zonas del molde con iones de Cr para mejorar la resistencia a la corrosión de un modo selectivo. En la Tabla IV se resumen algunas de las aplicaciones mas notables de la implantación iónica en este sector.

Sector mecánico y afines.

La implantación iónica encuentra un gran numero de aplicaciones en este sector a pesar de la competencia de otros tratamientos de superficie. Las ventajas, que aporta este tratamiento se indican posteriormente, pero una de las razones por las que se utiliza la implantación iónica es que puede aplicarse sobre herramientas ya acabadas sin riesgos de deformaciones y como ultimo paso antes de su utilización industrial.

Las herramientas que han sido tratadas con éxito son por ejemplo útiles de metal duro (WCCo) para el trefilado de alambre, cilindros de laminación, rodillos de acabado, punzones, herramientas de estampación, matrices de embutición, etc. con mejoras por lo general de tres a cinco veces en la duración de la herramienta. Adicionalmente, la implantación de nitrógeno puede reducir la adherencia o soldadura en frío del material de trabajo a la herramienta, por ejemplo en la estampación de cierres y bases de latas de aluminio, laminación de cobre o estirado de hilo de acero inoxidable. Por lo general en las herramientas de corte para aleaciones férreas no se han obtenido los mejores resultados con la implantación de nitrógeno, debido al calentamiento de la herramienta en la zona de trabajo, que produce una difusión del nitrógeno implantado. No obstante, se han logrado buenos resultados en cuchillas, machos de roscar, escariadores y otros útiles

Al margen de las herramientas, se han obtenido también buenos resultados en bolas y anillos para rodamientos, en donde la implantación combinada de titanio y carbono reduce el desgaste, y la implantación de cromo o tántalo aumenta de un modo sensible la resistencia a la corrosión de estos componentes. En la industria del automóvil se puede utilizar con muy buenos resultados en los inyectores de combustible para motores diesel y también en componentes de transmisión para coches de competición. En ciertos casos también se puede utilizar la implantación de nitrógeno sobre componentes que han sido nitrurados previamente, obteniéndose una mejora mas significativa que cualquiera de los dos procesos (Nitruración o implantación iónica) por separado. La Tabla V resume algunas aplicaciones significativas de la implantación iónica en el sector mecánico.

Aplicaciones en medicina.

Las características particulares de la implantación iónica convierten este proceso como el idóneo para ciertas aplicaciones medicas, sobre todo en prótesis de cadera, rodilla, etc.. Tradicionalmente los materiales usados en estos componentes han sido las aleaciones de CoCr y el acero inoxidable, fundamentalmente AISI 316. Ahora bien, estos materiales presentan algunos problemas, sobre todo de

tipo químico, debido a la difusión en el organismo humano de determinados elementos de naturaleza tóxica o cancerígena, como el cobalto, cromo o níquel. La implantación de nitrógeno mejora sustancialmente este problema al mejorar la resistencia a la corrosión y también el desgaste de estos materiales, sobre todo de las aleaciones de Co–Cr.

Actualmente estos materiales están siendo sustituidos por aleaciones de titanio (Ti–6Al–4V), debido a su mayor compatibilidad biológica. Sin embargo, el comportamiento tribológico del titanio (desgaste abrasivo y adhesivo) es peor. La implantación de nitrógeno mejora sensiblemente su comportamiento frente al desgaste y fricción. Uno de los casos en que la implantación iónica es una solución idónea a estos problemas es en implantes de prótesis de articulaciones. En implantes de cadera, por ejemplo, las superficies de contacto suelen ser de aleación de Ti–6Al–4V en la cabeza femoral y polietileno de alto peso molecular (UHMWPE) en la cápsula acetabular. La implantación iónica en la superficie de la aleación de titanio reduce por un lado su desgaste y por otro, al reducir la fricción de las superficies de contacto, disminuye significativamente el desgaste de la cápsula acetabular.

Otra propiedad que mejora la implantación iónica es el comportamiento frente a la fatiga, por lo que esta especialmente indicado para placas óseas utilizadas en fracturas, cuando estas se ven sometidas a grandes esfuerzos de tracción y compresión. La Tabla VI resume algunas de las aplicaciones de la implantación y texturizado iónicos en el campo médico.

Tabla V: Aplicaciones de la implantación iónica en el sector mecánico.

Origen	Material base	Ion implantado	Observaciones
para la industria del Aluminio elementos bolas y agujas s de refrigeración dos para ambientes corrosivos os de combustible en es nucleares res de combustible ores diésel de transmisión en de competición	AISI 52100, 93100, M 50	Ti ⁺ +C ⁺	Aumento de vida x 4.
		Ti ⁺ +C ⁺ , Cr ⁺	Mejora de la resistencia al desgaste y a la corrosión.
		Ti ⁺ + C ⁺	Mejora de 2 veces sin lubricación, reducción de fricción.
	Circonio	N ⁺	Endurece la superficie y elimina ruido en la señal eléctrica
Aceros de combustibles Aceros de combustibles Aceros diésel de transmisión en de competición	Zircaloy	Sn ⁺ , Cr ⁺ +C ⁺	Reducción del "fretting" y el ataque corrosivo a altas temp.
		N ⁺ +N ₂ ⁺	Reducción significativa del desgaste erosivo (>100 veces).
	Acero de herramienta	N ⁺ +N ₂ ⁺	Aumento significativo de su duración.
	Acero	N ⁺	Se reduce la fricción de contacto y el desgaste.
Aceros y cabezales de afeitado eléctrico a cortadora os de corte de embutición de acero es de extrusión de recalcado	Acero herramienta H11	N ₂ ⁺	Aumentó su duración de 3 semanas a más de 6 meses.
	Acero herramienta H11	C ⁺ , N ⁺	Aumento de vida x 4
	Metal duro (WC-Co)	N ₂ ⁺	Mejora de la vida en 2 a 3 veces.
	Acero rápido AISI M2	N ⁺	Mejora de resist. desgaste en 15%, (80% con trat. térmico)
	Acero AISI D2	N ⁺ +Ag ⁺	Mejora resist. desgaste hasta 25%, (85% con trat. térmico)
		N ⁺ +Sn ⁺	Mejora resist. desgaste hasta 20%, (90% con trat. térmico)
		N ⁺	Mejora resist. desgaste en 25%, (50-60% con trat. térmico)
		B ⁺	Sin mejora. Mejora 20-60% con tratam. térm. posterior.
	Acero AISI 9310	N ⁺ +N ₂ ⁺ , Ta ⁺	Mejora resist. desgaste ≥ 40%, reducción desgaste adhesivo.
		N ⁺ +N ₂ ⁺	Aumento de vida de la herramienta de 2.5 a 12 veces.
Aceros y punzones para acero as para acero laminado en caliente buntido profundo para 010 y 304	Acero rápido AISI M2	N ⁺ +N ₂ ⁺	Mejoras de 2 (M2) y 4 veces (D2).
	Aceros M2 y D2	N ⁺ +N ₂ ⁺	Mejoras de 10 a 22 veces en acero D2. Sin mejora en A2.
	Aceros D2 y A2	N ⁺ +N ₂ ⁺	Aumentó la duración de la herramienta de 2 a 80 veces.

Tabla V: (Continuación).

Ref.	Componente	Material base	Ion implantado	Observaciones
12, 25	Trefilado de alambre	Metal duro, Diamante	N ⁺ +N ₂ ⁺	Mejora la resist. al desgaste >2, menor soldadura
27	Estampas de bases y cierres de latas de Al	Acero D2	N ⁺	Reducido el desgaste 3 veces, se evita la soldadura
	Rodillos de acabado para varillas de Cobre	Acero H13	N ⁺	Aumento vida herramienta > 3, Mejora el acabado
	Guías de alambre	Acero recubierto con Cr	N ⁺	Aumentó la producción en > 3, sin desgastes
	Punzones de precisión comp. electrónicos	Metal duro (WC-Co)	N ⁺	Mejora de la vida del útil superior a 2.
	Cortadores de papel y telas	Acero herramienta	N ⁺ +N ₂ ⁺	Mejora de la vida del útil de hasta 16 veces
28	Rodamientos para ambientes salinos	Acero M50	Cr ⁺ , Ta ⁺	Aumentó la resistencia a la corrosión en 6,
29	Punzones	Acero	C ⁺ , B ⁺ , Ti ⁺ , N ⁺	Se aumentó la resistencia al desgaste más de 3 veces
30	Estampa para piezas de acero	Acero D2	N ⁺	Aumento de la vida de la herramienta superior a 2
	Punzón y matriz para piezas de inox. 430	Acero D2 (Rc 58)	N ⁺	Aumento de la vida de las herramientas x 2
	Rodillos de cierre y estampa cortadora para latas	Acero D3	N ⁺	Aumento de la vida de la herramienta superior a 2
	Machos de roscar para inox. 430 y latón 60/40	Acero rápido M2	N ⁺	Aumento de la duración de los machos en 2 veces
	Escariadores (9 mm Ø)	Acero rápido M2	N ⁺	Aumento de la duración de la herramienta superior a 2
	de acero de Rc 45-50	Acero rápido M2	N ⁺	Aumento de la duración de la herramienta superior a 2
	Brocas (<2 mm Ø), cuchillas para circ. impresos	Metal duro (WC-Co)	N ⁺	Mejora de tenacidad y resistencia al desgaste
32	Machos de roscar, terrajas	Aceros M7 y M 35	N ⁺	Se mejoró en más de 2 veces su resistencia al desgaste
	Rodillos para manipular varillas de acero	Acero H 13 nitrurado	N ⁺	Se aumentó la vida del útil en 5 veces.
	Escariadores para acero	Acero rápido M2	N ⁺	Se aumentó la vida del útil en 2 veces.

Tabla VI: Aplicaciones de la implantación iónica y tratamientos afines en biotecnología y medicina.

Componente	Material base	Tratamiento / Ion	Observaciones
Sistemas quirúrgicos y óseos	Aleaciones Co-Cr	N ⁺	Mejora de la resistencia a la corrosión.
	Acero inoxidable (AISI 316L)	B ⁺ , C ⁺ , N ⁺	Mejora de la resistencia a la fatiga.
	Láminas de Titanio de 50 µm	Ataque (Ar ⁺) Texturizado	Producción de agujeros 50 µm Ø mediante ataque "iónico". Los iones producen un texturizado superficial que mejora la adherencia del tejido y reduce la resist. eléctrica de contacto. Aumento de vida x 5 a 100 (laboratorio). En producción.
Sistemas de cadenera dentales	Aleación de Ti (Ti-6Al-4V)	N ⁺	Aumento de vida x 3. Se reduce la fuerza de corte.
	Metal duro (WC-Co)	N ⁺	Se duplicó la duración de los limpiadores.
	Aleación de Titanio	N ⁺	Mejora resistencia al desgaste en 30 veces.
	Aleación de Co-Cr	N ⁺ (Ionguard®)	Mejora la microdur. x 1,5 veces y reduce la fricción 50%.
Sistemas de cadenera de dientes (ultrasonidos) y articulaciones	Aleación de Ti (Ti-6Al-4V)	N ⁺	Mejora significativamente la resistencia al desgaste.
	Acero inoxidable (AISI 316L)	N ⁺	Mejora resistencia al desgaste de 5 a 20 veces.
	Poliétileno (UHMWPE)	N ⁺	Mejora de la resistencia al desgaste de 2 a 10 veces.

Comparación y/o combinación con otros tratamientos.

La implantación iónica es uno de los nuevos Tratamientos Avanzados de Superficie que están revolucionando la industria moderna. A menudo, especialmente entre usuarios desinformados, se produce cierta confusión entre los tratamientos que van saliendo al mercado, y hay una clara desorientación a la hora de escoger el mas adecuado, hasta el punto de que la mejor solución es dejarse aconsejar por el centro tecnológico, especialmente cuando este centro dispone de varias tecnologías alternativas, lo que garantiza una elección objetiva de la solución.

En líneas generales, la implantación iónica es la mejor elección para problemas de desgaste adhesivo o abrasivo no muy severo, o para determinados problemas de corrosión, especialmente cuando la pieza a tratar no admite recubrimientos o no debe ser expuesta a tratamientos a altas temperaturas. Los recubrimientos por PVD serían la alternativa cuando estas limitaciones no existen, o cuando el desgaste es más considerable, y, finalmente. El CVD se reservaría para desgastes muy severos, recovecos interiores y piezas que admiten tratamientos a alta temperatura. No obstante este es un escenario cambiante, especialmente por lo que se refiere al CVD.

VENTAJAS		
Implantación Iónica	PVD	CVD
Temperatura de proceso muy baja (< 150°C): No afecta al temple-revenido.	Temperatura de proceso relativamente baja (200 - 500°C). Normalmente no hay que volver a templar- revenir	
No precisa tratamientos posteriores	Normalmente no requiere tratamientos posteriores	
Acabado superficial totalmente inalterado	Poca influencia en el acabado superficial	
Forma y dimensiones totalmente inalteradas	Poca influencia en la forma y dimensiones	
Sin posibilidad de desprendimiento		Muy buena adhesión. Mínimo riesgo de delaminación
Tratamiento sin riesgos		Tratamiento muy uniforme incluso en recovecos
Limpieza previa necesaria pero no tan crítica como en el PVD		La limpieza previa no es crítica

Cuadro 1: Ventajas de los distintos tratamientos

DESVENTAJAS		
Implantación Iónica	PVD	CVD
Proceso direccional No adecuada para herramientas que trabajan a alta temperatura ($>300^{\circ}\text{C}$) La capa implantada no es muy profunda ($< 0.5 \mu$). No adecuada para desgaste abrasivo severo	Proceso direccional La temperatura del tratamiento puede afectar a aceros con revenidos a baja temperatura Añade $2 - 3 \mu\text{m}$ a las dimensiones de la herramienta La limpieza previa y el estado superficial son muy críticos. Cuando no son perfectos no se puede aplicar el PVD. Riesgo de desprendimiento del recubrimiento Puede no ser suficiente para el desgaste abrasivo severo.	La temperatura proceso alcanza 1000°C. Puede causar deformaciones. Los aceros serán pre-templados después del tratamiento. Añade $3 - 10 \mu\text{m}$ a las dimensiones de la herramienta Altera el acabado superficial. Puede ser necesario pulir el recubrimiento

Cuadro 2: Inconvenientes de los distintos tratamientos

	Implantación Iónica	PVD	CVD
Capacidad de solución de diversos problemas	Desgaste adhesivo a cargas bajas Desgaste abrasivo medio Corrosión	Desgaste adhesivo a cargas relativamente altas Desgaste abrasivo fuerte Corrosión (con limitaciones)	Desgaste Abrasivo severo Herramientas sueltas a grandes esfuerzos
Aplicaciones típicas	Punzones, troqueles y matrices para chapa de acero y otros metales Moldes de inyección de plástico Herramientas de corte para plásticos, caucho, papel y alimentos Herramientas de mecanizado especiales	Herramientas de mecanizado, brocas, fresas y plaquitas. Pequeños punzones y troqueles para hojalata y acero inoxidable Matrices de estirado Componentes de moldes de plástico	Plaquitas de mecanizado Pequeños punzones y troqueles para hojalata y acero inoxidable

Cuadro 3: Aplicabilidad de los distintos tratamientos

Por ultimo es importante comentar que la implantación iónica no debe ser considerada únicamente como una alternativa a otros tratamientos sino que puede ser también un tratamiento complementario, especialmente de los tratamientos convencionales, con los que no esta en competencia. En efecto, el bombardeo iónico obedece a mecanismos similares tanto si se realiza sobre metales base como sobre recubrimientos metálicos o cerámicos, o materiales previamente tratados térmica o termoquímicamente. Tiene pues pleno sentido implantar materiales ya tratados o recubiertos, y los

resultados son positivos en muchos casos, según se expone a continuación

Tres ejemplos permitirán ilustrar este último punto:

A) Nitruración: Tanto la nitruración gaseosa convencional como la nitruración iónica (no confundir con la implantación iónica!), son ideales para producir capas duras de algunas décimas de milímetro. Si bien la implantación de iones de Nitrógeno podría suponerse en cierto sentido asimilable al proceso termoquímico, la diferencia queda puesta de manifiesto al comprobar que herramientas nitruradas son susceptibles de aumentar su vida media por un factor entre 2 y 3 cuando se someten a implantación de Nitrógeno. La fina dispersión de precipitados de Nitruros, característica del bombardeo iónico, parece ser la causa última de esta diferencia. Ejemplos típicos son los troqueles y punzones de corte empleados en la fabricación de envases metálicos (la nitruración puede aumentar su vida por un factor 5 y la implantación por un factor 3 extra), así como las matrices para la extrusión de plásticos cargados. Así, en herramientas que usualmente se emplean nitruradas tiene pleno sentido su posterior implantación, debiendo emplearse esta como tratamiento alternativo únicamente cuando la nitruración convencional fragiliza en exceso la pieza.

B.) Cromo duro: Este es uno de los casos en los que con más seguridad puede recomendarse un tratamiento de implantación posterior al recubrimiento. Se ha descrito muchas veces que las mejoras producidas en los Aceros por la implantación de Nitrógeno están relacionadas con el contenido en Cromo de los mismos. Parece lógico, y así se comprueba en la realidad, que cuando el material a implantar es el propio Cromo, como ocurre con sus recubrimientos electrolíticos, la mejora sea muy notable. Ejemplos prácticos que pueden darse son los moldes de inyección de plástico y los troqueles de acuñación de monedas. La implantación de Nitrógeno multiplica por un factor entre 3 y 4 la vida útil de la pieza. La explicación estriba en la formación de Nitruros de Cromo finamente dispersos así como en la compactificación y homogeneización de la capa autoprotectora de Óxido de Cromo. Las herramientas cromadas e implantadas exhiben muchas veces un suave color dorado, cosa excepcional, pues los tratamientos por implantación iónica no suelen cambiar el color de los sustratos. Hay que decir por último que la implantación nunca solucionará los problemas derivados de la mala adhesión del cromado al sustrato.

C) Nitruro de Titanio: La implantación de Nitrógeno, pero también de iones metálicos, en herramientas recubiertas de TiN como punzones para la fabricación de envases metálicos o plaquitas de mecanizado, aumentan hasta por un factor 2 la vida de los mismos e incluso, en el segundo ejemplo, permiten trabajar a mayores velocidades. No hay explicaciones unánimemente aceptadas para estos casos y de hecho es un terreno en el que se sigue trabajando. Una línea de acción paralela consiste en la realización de recubrimientos tipo IBA, donde el bombardeo iónico se efectúa simultáneamente a la deposición física de vapor, consiguiéndose recubrimientos más compactos y mejor adheridos de estequiometría controlada.

ELECCION DEL PROCESO:

Innumerables pruebas de laboratorio han demostrado que una correcta elección del tipo de ion o elemento a implantar sobre un material determinado, (por Ej. : acero, metal duro o aleaciones de titanio), puede provocar cambios sustanciales en el comportamiento superficial del mismo. Parece lógico elegir el elemento adecuado a introducir en un material teniendo en cuenta consideraciones metalúrgicas, tales como su posible combinación con los elementos de aleación del material base. El ejemplo más característico es el de la implantación de nitrógeno sobre materiales férricos, capas de cromoduro y aleaciones de titanio para mejorar su comportamiento tribológico. El endurecimiento de la superficie de estos materiales por la implantación de nitrógeno se debe fundamentalmente a la producción de precipitados de compuestos duros (ej. nitruros de hierro, cromo, titanio, etc.); también puede reforzar la superficie del material mediante la formación de una solución sólida intersticial y la

creación de tensiones residuales compresivas. La tabla siguiente muestra una relación de algunos de los elementos que se han implantado sobre ciertos materiales y las propiedades que se pueden modificar, al margen de las aplicaciones en tecnología de semiconductores.

La elección de la combinación adecuada del ion y sustrato es determinante para obtener el máximo beneficio del proceso. Sin embargo no han de obviarse consideraciones inherentes al propio proceso de la implantación iónica, tales como la dosis de iones a implantar, su energía y la temperatura que alcanzan las piezas durante la implantación. Generalmente la implantación de iones para aplicaciones mecánicas se realiza a dosis superiores a 10¹⁷ iones/cm² para obtener resultados significativos. Las energías comercialmente utilizadas oscilan de 50 a 200 keV y mediante una correcta selección de energías, dosis y naturaleza de los iones, se pueden obtener distintos perfiles de concentración de acuerdo con las propiedades que se desee proporcionar a la pieza tratada.

Combinaciones ion-sustrato utilizadas en I+D y en la industria.			
SUSTRATOS	IONES	PROBLEMA	APLICACION
Acero rodam., herra.	Ti + C, C	Desgaste	Rodam., herram., válvulas, etc.
Acero inox, herram.	N	Desgaste, fricción	Moldes, herramientas, etc.
Acero	Cr	Corros, desgaste	Rodamientos, herram. Medicas.
Acero	Ta + C	Desgaste adhesivo	Ruedas dentadas, piñones, etc.
Acero	Pb, Mo + S	Fricción	Componentes mecánicos.
Acero nitrurado	N	Desgaste	Cilindros, boquillas, moldes, etc
Acero inoxidable	P	Corrosión	Compon. Marinos e Ind. química.
Níquel	P	Desgaste	Industria química, mecánica.
Capas de Cromoduro	N	Desgaste, fricción	Asientos válvulas, moldes etc.
Aleac. Aluminio	N	Desgaste.	Molde para plástico, caucho etc.
Aleac. Aluminio	Mo	Corrosión	Compon. marinos ,aeroespaciales.
Aleac. Titanio	N, C	Desgaste y corros.	Prót. Ortopédicas, aeroespaciales
Aleac. Circonio	C	Desgaste y corros	Compon nucleares, químicos.
Superaleaciones	Y, Ce, Al	Oxidación	Alabes de turbinas
Superaleaciones	Ti + C	Desgaste	Spinnerettes
Aleac. Cobre	Cr	Corrosión	Baterías
Aleac. Berilio	B	Desgaste	Rodamientos, moldes
Metal duro (WC-Co)	N, Metales	Desgaste	Brocas, punzones, insertos, hileras
Diamante	N	Desgaste	Hileras, herramientas de corte.
Cerámicas	N, Al, Ti...	Oxidac., desgaste	Motres adiabáticos, turbinas
Capas de TiN	Al, C, V...	Desgaste, fricción	Herramientas de corte, insertos
Polímeros	Ar, N, etc.	Conduct., textura	Microelectrónica, medicina
Polímeros	Ti. Al, etc.	Prop. Mecánicas	Compon. aeroespaciales, automóvil

La temperatura de implantación es también, muy importante, ya que puede determinar el éxito o fracaso del tratamiento. Por ejemplo, la implantación a baja temperatura sobre materiales férreos es una regla establecida con objeto de no deteriorar sus propiedades iniciales. La utilización indebida de altas densidades de corriente en componentes sin disipación de calor adecuada puede producir un calentamiento perjudicial de la pieza. Este calentamiento podría conducir al elemento implantado a profundidades mayores, por fenómenos de difusión. Sin embargo, el efecto total generalmente es perjudicial debido a la degradación de la microestructura superficial de material.

Una pregunta frecuente del usuario potencial de la implantación iónica es la de cuando puede utilizarse esta tecnología en preferencia a otros procesos más convencionales, ya establecidos en la industria. La elección de un tratamiento de superficie determinado se ha de realizar teniendo en cuenta una serie de factores entre los que se encuentran: el tipo de material base y su geometría, las condiciones de operación de este componente y su medio de trabajo, aspectos económicos y disponibilidad del tratamiento de superficie, etc... La selección adecuada debe realizarse combinando todos esos factores y evitando en lo posible tener en cuenta sólo consideraciones económicas.

Los componentes o herramientas que pueden beneficiarse en mayor medida de la implantación iónica tienen una serie de particularidades que se exponen en la tabla siguiente. Generalmente la implantación iónica se utiliza en componentes de precisión, herramientas o moldes que poseen un alto acabado superficial y unas tolerancias muy ajustadas. La baja temperatura de la implantación y la naturaleza del proceso evita riesgos de deformaciones o degradación del pulido o texturizado superficial. Estos componentes son por lo general de un coste elevado y el coste del tratamiento es solo una fracción del mismo. En el caso de componentes de un precio unitario bajo, la implantación iónica puede justificarse económicamente en el caso de que el tratamiento se realice sobre un gran numero de piezas.

En determinadas circunstancias el coste no es el factor predominante, si no que exige una fiabilidad máxima de operación, ya que o bien el fallo del componente puede conducir a consecuencias catastróficas (aplicaciones aero-espaciales, biotecnología, etc...), o el reemplazamiento del componente dañado es muy problemático. Bajo estas circunstancias la aplicación de la implantación iónica es una solución válida.

Existen determinadas aplicaciones en donde la utilización de la implantación iónica no proporciona ninguna ventaja. Un ejemplo característico es en situaciones de desgaste extremadamente severo, tales como las encontradas en la minería. En estos casos la superficie implantada se eliminaría rápidamente sin proporcionar protección alguna al material base, por lo que generalmente se utilizan recargues de materiales duros en las zonas de trabajo. Otra área en que la implantación iónica, en particular la de nitrógeno, no ha demostrado utilidades en forja en caliente o en situaciones donde la temperatura de trabajo es superior a 500 °C, ya que la superficie implantada se oxida rápidamente y pierde cualquier propiedad de resistencia al desgaste. Adicionalmente, el nitrógeno implantado sufrirá una difusión, eliminándose la protección frente al desgaste en la zona de trabajo.

Implantación Iónica de Nitrógeno

La mayor parte de los problemas de desgaste de las herramientas tratadas por implantación iónica se solucionan mediante la implantación de iones de Nitrógeno ($14N^+$ ó $14N^{2+}$). Ejemplos típicos son los útiles hechos de acero de herramientas con alto contenido en Cromo, Aceros inoxidables, Metal Duro y recubrimientos de Cromo duro. La implantación de Nitrógeno en estos materiales produce:

- Creación de esfuerzos compresivos en las primeras capas superficiales.
- Formación de precipitados de Nitruros duros.
- Inhibición del movimiento de dislocaciones.
- Estabilización de las capas finas superficiales de óxido metálico.

Estos mecanismos se combinan para incrementar la dureza superficial (hasta un rango de media micra de profundidad) y limitar los mecanismos de desgaste adhesivo. A pesar de la semejanza de sus nombres, la "Implantación Iónica de Nitrógeno" no debe confundirse con la "Nitruración Iónica" que es un proceso muy diferente.

Implantación Iónica de Cromo

La resistencia a la corrosión de los aceros de herramientas puede aumentar considerablemente mediante la implantación de iones de Cromo (52Cr+). El efecto principal de este tratamiento es la re-aleación de las primeras décimas de micra del acero, aumentando su contenido en Cromo hasta el 30%. Se crea así una superficie pasivada de óxido de Cromo que aumenta la resistencia a la corrosión.

VENTAJAS Y LIMITACIONES de la implantación iónica:

Ventajas:

- Consigue **aumentos de vida útil de hasta cinco o diez veces** (según la aplicación) para un gran número de piezas y componentes críticos de los más variados procesos industriales.
- **No produce cambio alguno de dimensiones** (no es un recubrimiento, sino un tratamiento en profundidad)
- **No produce cambio alguno en el acabado superficial** (respeta los pulidos o las texturas iniciales)
- Hay una transición gradual entre zona tratada y sustrato de manera que **la parte tratada no puede desprenderse**.
- Se aplica a **baja temperatura** (por debajo de 150°C), de manera que no produce deformaciones, revenidos, etc.
- **Puede aplicarse sobre otros tratamientos** (nitruración, Cromo duro, TiN ...) multiplicando sus efectos.
- Es **extremadamente controlable** y, por lo tanto, repetible.
- **Puede limitarse selectivamente** a las partes de las piezas que se desean proteger, enmascarando fácilmente el resto.
- Es **muy versátil** dado el gran número de posibles combinaciones de iones y parámetros del proceso.
- Es **medioambientalmente limpia**.

Limitaciones:

- Es una **técnica de línea recta**, lo que quiere decir que no se pueden tratar dos componentes a la vez, si no que hay que hacerlo secuencialmente. Además, las partes de la superficie ocultas a la incidencia del haz de iones (recovecos etc.) no pueden ser tratadas, y los interiores de cavidades donde el haz entra rasante tampoco se benefician de la implantación.
- Es una **técnica de alto vacío** lo que significa altas inversiones en equipos y mantenimiento, tiempos muertos de carga y descarga y limitaciones de volumen dependiendo del tamaño de la cámara de tratamientos.
- Es una **técnica para problemas de temperatura media o baja**: si la superficie tratada sobrepasa los 400-500°C, el tratamiento deja de ser eficaz.
- **No es adecuada para problemas severos de desgaste o corrosión**, ni, por supuesto, para problemas de rotura.
- **No admite rectificadores posteriores** a la implantación: destruirían el tratamiento. La implantación debe ser siempre el tratamiento final.
- **Poca penetración de los iones** (normalmente inferior a 1 µm).
- Posee relativamente un **alto coste de inversión** del equipo.
- **Proceso de alta tecnología**, precisa de una operación y mantenimiento especializado.
- Algunos parámetros del proceso se encuentran aún en desarrollo.
- Es un **proceso aun no conocido** totalmente por la industria.

Historia de la implantación iónica en España

Los primeros trabajos basados en la implantación iónica de produjeron en los años 60 por Harwell y el Naval Research Laboratory. Posteriormente, en 1965 se hizo la primera conferencia sobre Implantación iónica (Aarhus).

En los años 70 se empezó a industrializar la implantación iónica con la primeras aplicaciones

electrónicas, que requerían equipos menos sofisticados. También se iniciaron las primeras implantaciones en metales.

Ya en los años 80 se comenzó la investigación y desarrollo sobre la implantación de aceros y otras aleaciones y se empezaron a desarrollar equipos más potentes y mas precisos. A finales de los 80 aparecieron los primeros centros de subcontratación de implantación iónica para empresas.

En los años 90 se desarrolló la industrialización del tratamiento en piezas metálicas, aunque todavía no es muy conocido en la industria.

El Centro de Implantación Iónica de AIN (actualmente Centro de Ingeniería Avanzada de Superficies) se estableció en 1989, empezando a dar servicios de Implantación Iónica con equipamiento propio en 1990. La aceptación de esta tecnología por la industria no fue inmediata, sino que requiso una importante labor de difusión principalmente orientada a los nichos de aplicación. Esta difusión se ha hecho en colaboración con centros de otros países europeos que cuentan con una experiencia de mas años en determinadas aplicaciones y que han ayudado a identificar problemas y soluciones y a avalar las ventajas del tratamiento Mediante la edición y difusión de videos, libros y boletines tecnológicos se ha conseguido que las empresas dediquen una atención cada vez mayor a esta tecnología, para acabar realizando sus primeras experiencias.

La dinámica de este tipo de pruebas es significativamente lenta pues en primer lugar pocas veces se tratan problemas no resueltos, sino que se trabaja en aplicaciones que tienen ya una solución y se esta buscando otra mejor. Esto significa que si determinado útil tiene una vida media de varios meses o de un año, en ocasiones hay que esperar dos años o más para advertir las mejoras. Dado que las primeras empresas que empezaron a emplear la implantación iónica en España lo hicieron en 1991, hasta 1994 no se ha podido constatar un crecimiento sostenido de la demanda de esta tecnología.

Entre los sectores que mayor uso están haciendo de la implantación iónica en nuestro país hay que destacar el de moldeo e inyección de plástico (implantaciones de Nitrógeno para problemas de desgaste y de Cromo para problemas de corrosión), el del procesado de papel y celulosa (cuchillas, rodillos, troqueles), el de fabricación de envases metálicos (punzones, troqueles, matrices), el alimentario (corte de vegetales, pelado de espárragos), el pulvimetalurgico (punzones, matrices) o el de mecanización de materiales compuestos (brocas, escariadores y fresas para composites epoxi-fibra de carbono) Aunque la mayor parte de las aplicaciones citadas son habituales en otros centros europeos, algunas se han desarrollado por primera vez en España, como es el caso del pelado de vegetales o la mecanización de composites.

El mapa de la Figura especifica el numero de empresas usuarias del Centro de AIN desde 1991, por regiones españolas.

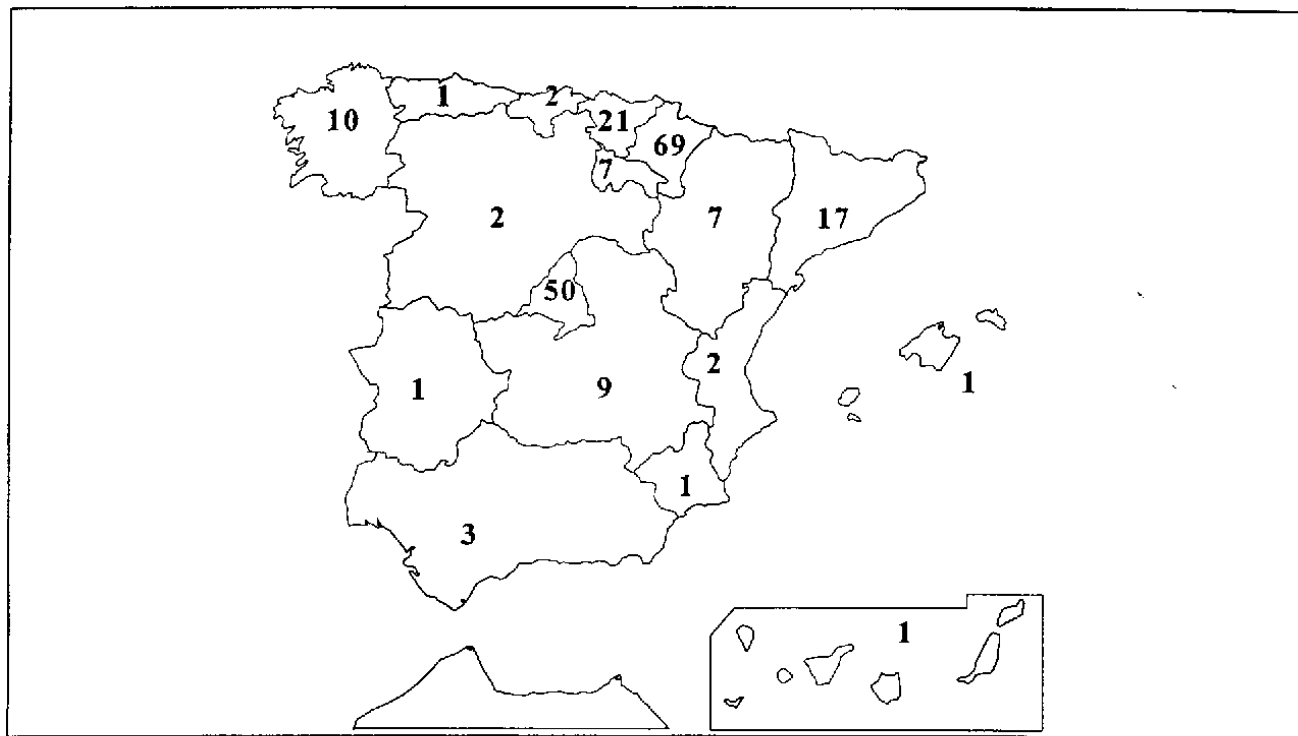


Figura 7: Distribución de usuarios del servicio de implantación iónica de AIN por regiones.

8. Panorama europeo y futuras tendencias.

La implantación iónica está especialmente desarrollada en el Reino Unido y Dinamarca, que son los países donde antes se realizó la investigación básica correspondiente. Actualmente cuentan con centros de subcontratación y empresas de referencia a nivel Europeo (DTI de Aarhus, Tecvac en Cambridge, Tech-ni-Plant en Birmmgham, Hatwell en Oxfordshire etc.). También cuentan con fabricantes de equipos de implantación (Tecvac en Reino Unido, Danfysik en Dinamarca).

Otros países donde existen empresas o centros de subcontratación son Alemania, Francia y España. En Italia, Portugal y Finlandia, así como en la mayoría de los otros países citados existen importantes grupos de investigación básica. Una encuesta realizada por AIN dentro del proyecto SPRINT RA-372 (AIN – DTI – imperial College) identificó mas de 80 centros y empresas entre Europa occidental y oriental (Bielorrusia, Lituania, Republica Checa).

Con un crecimiento de facturación en el 25%, los tratamientos por implantación iónica siguen conquistando mercado en Europa, a pesar de que, en comparación con otros tratamientos (PVD, Plasma, Nitruración iónica) seguirán siendo minoritarios durante al menos una década.

Las tendencias a nivel mundial, además de la consolidación de los nichos de aplicación y el establecimiento de otros nuevos, radica en el diseño de implantadores más baratos y fáciles de usar y el desarrollo de técnicas alternativas, como el IBAD (Recubrimientos asistidos por hace de iones) o la implantación iónica por inmersión en plasma que, aunque tiene el inconveniente de ser sin separación e masas y de calentar las piezas, permite tratar series largas en tiempos razonablemente breves.

CONCLUSIÓN

La implantación iónica es uno de los tratamientos superficiales mas novedosos en España y todavía no es muy conocido en la industria. Pero creo que poco a poco se ira abriendo camino gracias a sus tremendas ventajas y aportaciones en el campo de los materiales.

Este trabajo me ha servido para conocer a fondo un tratamiento superficial que era completamente desconocido para mí. Creo que es un procedimiento muy útil en la industria y que debería ser parte importante del temario de esta asignatura junto con los recubrimientos PVD y CVD.

También me ha servido para ver como se establece una nueva tecnología en España. Este punto me ha sorprendido porque yo creía que el gobierno apoyaba la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, pero he visto que eso es una verdad a medias. Y que por lo tanto es bastante difícil introducir nuevas tecnologías en este país, en comparación con otros países de Europa.

Espero que este documento aporte conocimientos a quien lo lea y que pueda aclarar cualquier duda simple sobre la implantación iónica.

Implantación iónica

Fig. 2. Esquema del implantador de iones de AIN.

Fig. 3. Concentración en profundidad de los iones implantados.

.Situaciones en donde es útil la implantación iónica.

- * Componentes cuya producción es cara. Componentes de elevado coste.**
- * Las tolerancias dimensionales de los componentes son muy ajustadas. Son componentes de gran precisión y pueden tener un gran acabado superficial. No aceptan ningún calentamiento por riesgo de deformación o pérdida de propiedades.**
- * El fallo de la pieza durante su servicio puede conducir a consecuencias catastróficas.**
- * Su reemplazamiento es difícil.**
- * El fallo del componente ocasiona un tiempo de parada costoso e inadmisibile.**
- * Las condiciones de trabajo precisan la utilización de un material especial (Ej. Ti, Al, etc.), pero que posee unas propiedades tribológicas (Ej. desgaste, fricción) aceptables.**
- * Las restantes opciones de tratamiento de superficie no proporcionan el resultado óptimo (Ej. resistencia al desgaste inadecuada, alta fricción, posibles fallos de adherencia en el caso de capas, se degrada el acabado superficial o texturizado, existen riesgos de deformaciones, etc.).**