



TRACTAMENTS TÈRMICS



# ***TRABAJO DESARROLLADO EN LAS INSTALACIONES DE TTC***

## ***EVAPORADOR PARA REACTOR DE RECUBRIMIENTOS***

Director proyecto: **Francesc Montalà i Guitart**

Realizado por: **David Fumás Fumás**





## ÍNDICE MEMORÍA

<b>1. OBJETIVO DEL PROYECTO</b>	<b>Pág. 5</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN A LOS RECUBRIMIENTOS</b>	<b>Pág. 7</b>
<b>2.1. ¿Qué es un recubrimiento?</b>	<b>Pág. 7</b>
<b>2.2. ¿Para qué sirve un recubrimiento?</b>	<b>Pág. 8</b>
<b>2.3. Tipos de recubrimientos</b>	<b>Pág. 9</b>
<b>2.3.1. Recubrimientos a alta temperatura</b>	<b>Pág. 10</b>
2.3.1.1. Proceso CVD (Chemical Vapour Deposition)	<b>Pág. 10</b>
2.3.1.2. Proceso TD (Toyota Difusion)	<b>Pág. 11</b>
<b>2.3.2. Recubrimientos a media temperatura</b>	<b>Pág. 13</b>
2.3.2.1. Proceso PVD (Physical Vapour Deposition)	<b>Pág. 13</b>
<b>2.3.3. Recubrimientos a baja temperatura</b>	<b>Pág. 15</b>
<b>3. RECUBRIMIENTOS PVD (Physical Vapour Deposition)</b>	<b>Pág. 16</b>
<b>3.1. Introducción</b>	<b>Pág. 16</b>
<b>3.2. Tecnología del recubrimiento PVD</b>	<b>Pág. 19</b>
<b>3.3. Sistemas de evaporación</b>	<b>Pág. 21</b>
<b>3.3.1. Evaporación térmica del metal</b>	<b>Pág. 22</b>
3.3.1.1. Por inducción o resistencias	<b>Pág. 22</b>
3.3.1.2. Por cañón de electrodos	<b>Pág. 23</b>
3.3.1.3. Por láser	<b>Pág. 23</b>
<b>3.3.2. Sistema “Sputtering” o Magnetron</b>	<b>Pág. 24</b>
<b>3.3.3. Evaporación por arco</b>	<b>Pág. 25</b>
3.3.3.1. Con acelerador magnético	<b>Pág. 25</b>



3.3.3.2. <i>Directo o por aislamiento del cátodo</i>	<b>Pág. 26</b>
<b>3.4. <i>Características de las capas</i></b>	<b>Pág. 27</b>
<b>3.5. <i>Tipos de recubrimientos</i></b>	<b>Pág. 30</b>
3.5.1. <i>Consideraciones previas al recubrimiento</i>	<b>Pág. 30</b>
3.5.1.1. <i>Tipo de acero</i>	<b>Pág. 30</b>
3.5.1.2. <i>Estado superficial</i>	<b>Pág. 32</b>
3.5.1.3. <i>Características geométricas</i>	<b>Pág. 33</b>
3.5.1.4. <i>Posible magnetización</i>	<b>Pág. 34</b>
3.5.2. <i>Limpieza</i>	<b>Pág. 35</b>
3.5.3. <i>Características de las diferentes capas</i>	<b>Pág. 37</b>
3.5.3.1. <i>Recubrimiento basado en nitruro de titanio (TiN)</i>	<b>Pág. 37</b>
3.5.3.2. <i>Recubrimiento basado en carbonitruro de titanio (TiCN)</i>	<b>Pág. 38</b>
3.5.3.3. <i>Recubrimiento basado en nitruro de titanio-aluminio (TiAlN)</i>	<b>Pág. 39</b>
3.5.3.4. <i>Recubrimiento basado en carburos de molibdeno (Moc)</i>	<b>Pág. 40</b>
3.5.3.5. <i>Recubrimiento basado en nitruro de cromo (CrN)</i>	<b>Pág. 40</b>
3.5.4. <i>Aplicaciones de las diferentes capas</i>	<b>Pág. 42</b>
<b>3.6. <i>Estado actual del desarrollo comercial</i></b>	<b>Pág. 44</b>
<b>3.7. <i>Próxima generación de recubrimientos</i></b>	<b>Pág. 46</b>
<b>3.8. <i>Conclusión</i></b>	<b>Pág. 48</b>



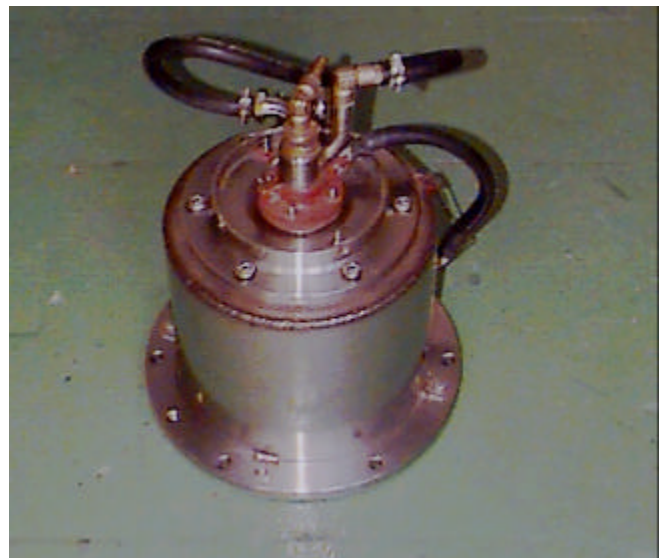
<b>4. EVAPORACIÓN POR ARCO</b>	<b>Pág. 49</b>
<b>4.1. Capas PVD obtenidas por evaporación por arco</b>	<b>Pág. 49</b>
<b>4.2. Tecnología de la evaporación por arco</b>	<b>Pág. 51</b>
4.2.1. Transporte del plasma	Pág. 52
4.2.2. Formación de la capa	Pág. 54
<b>4.3. Inconvenientes</b>	<b>Pág. 57</b>
<b>4.4. Control de calidad de las capas obtenidas</b>	<b>Pág. 58</b>
<b>5. INSTALACIÓN DE RECUBRIMIENTOS PVD</b>	<b>Pág. 60</b>
<b>5.1. Reactor</b>	<b>Pág. 60</b>
5.1.1. Cámara	Pág. 61
5.1.2. Sistema planetario	Pág. 62
5.1.3. Evaporadores	Pág. 63
5.1.4. Mirillas de control	Pág. 64
<b>5.2. Equipo de vacío</b>	<b>Pág. 65</b>
5.2.1. Bomba primaria o previa	Pág. 65
5.2.2. Bomba difusora	Pág. 66
<b>5.3. Sistema de gases</b>	<b>Pág. 67</b>
<b>5.4. Sistemas eléctricos y electrónicos</b>	<b>Pág. 68</b>
<b>5.5. Paneles de control</b>	<b>Pág. 69</b>
<b>6. ESTADO ACTUAL DE LOS EVAPORADORES</b>	<b>Pág. 70</b>
<b>7. OBJETIVOS Y MEJORAS A INCORPORAR</b>	<b>Pág. 72</b>
<b>7.1. Cambio rápido de cátodo</b>	<b>Pág. 73</b>
<b>7.2. Refrigeración de cátodo indirecta</b>	<b>Pág. 77</b>
<b>7.3. Cambio rápido de electrodos</b>	<b>Pág. 79</b>
<b>7.4. Conexiones rápidas de agua</b>	<b>Pág. 81</b>
<b>8. Mejoras del aspecto exterior</b>	<b>Pág. 82</b>

## 1. OBJETIVO DEL PROYECTO

La empresa Tratamientos Térmicos Carreras, S.A., ubicada en Sabadell, está dedicada a la tecnología de los tratamientos térmicos desde hace casi 50 años y debido a la creciente demanda de recubrimientos en la industria, esta empresa se introdujo en el campo de los recubrimientos a alta temperatura en 1985. Posteriormente, en 1995 aumentó la gama de recubrimientos a media temperatura con la tecnología PVD (Physical Vapour Deposition).

Dicha tecnología PVD consiste en evaporar un metal mediante un arco eléctrico dentro de una cámara con un grado de vacío muy elevado, haciéndolo reaccionar posteriormente con un gas reactivo introducido a muy baja presión y depositándose sobre el sustrato a recubrir.

Los reactores PVD de procedencia rusa tienen una gran posibilidad de mejoras en muchos de los elementos que los componen. Uno de los elementos más importantes de un reactor de recubrimientos es el **evaporador**. El objetivo del proyecto es el diseño y fabricación posterior de un evaporador para un reactor de recubrimientos.





Se pretende lograr una mayor calidad del recubrimiento así como eliminar problemas de calor que existen actualmente. Se pretende lograr una reducción en el tiempo de mantenimiento y en el proceso de manipulación así como una modernización general.

En definitiva, el objetivo se basa en conseguir una reducción del tiempo que suponen los cambios de cátodo, disminución del mantenimiento y manipulación más asequible del evaporador.



## **2. INTRODUCCIÓN A LOS RECUBRIMIENTOS**

Previamente para introducirnos en la tecnología de los recubrimientos, bastará con responder a dos preguntas básicas:

- 1. ¿Qué es un recubrimiento?**
- 2. ¿Para qué sirve un recubrimiento?**

Posteriormente veremos los diferentes tipos de recubrimientos que existen actualmente en el mercado, haciendo una gran diferenciación entre los de alta y baja temperatura, y enunciando brevemente los diferentes procesos que existen.

### **2.1. ¿QUÉ ES UN RECUBRIMIENTO?**

*Recubrimiento es sobreponer a un material, otro material de naturaleza distinta para mejorar las propiedades del primero.*

Dentro de los recubrimientos duros, mejoramos la resistencia al desgaste en matrices, herramientas y útiles para mecanizar, cortar y en definitiva dar forma a otros materiales ha evolucionado de tal forma en los últimos años, que actualmente constituye una de las tecnologías punta en el campo de los tratamientos térmicos.



## **2.2. ¿PARA QUÉ SIRVE UN RECUBRIMIENTO?**

Un recubrimiento tiene la finalidad de mejorar ciertas propiedades superficiales, por lo tanto la productividad de manera extraordinaria de toda matriz, útil o herramienta de corte o conformado. Se obtiene a la vez una reducción de los costes de fabricación y da una mejor calidad final de las piezas producidas.

Esto se consigue mediante recubrimientos específicos en las zonas de trabajo de las herramientas y útiles. Los recubrimientos duros sobre las herramientas de corte y útiles consiguen como característica más importante una **mayor resistencia al desgaste**.

## **2.3. TIPOS DE RECUBRIMIENTOS**

En la actualidad existen tres grandes grupos utilizados en el ámbito industrial para la aplicación de recubrimientos de capas duras y finas, donde la característica principal que los diferencia es la temperatura del proceso:

- 1. Recubrimientos a alta temperatura (aprox. 1000 °C)**
- 2. Recubrimientos a media temperatura (aprox. 500 °C)**
- 3. Recubrimientos a temperatura ambiente**

### **2.3.1. RECUBRIMIENTOS A ALTA TEMPERATURA**

#### ***2.3.1.1. Proceso CVD (Chemical Vapour Deposition)***



Utiliza la descomposición a alta temperatura de un halogenuro del metal a implantar y la combinación del mismo con un gas reactivo, para formar los compuestos característicos buscados. Pueden obtenerse capas como son los:

- **Nitruros de titanio (TiN)**
- **Carburos de titanio (TiC)**
- **Oxidos de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

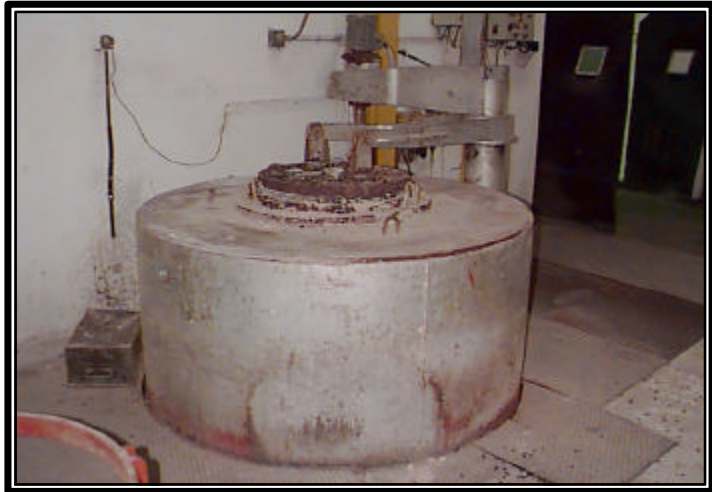
o combinaciones de las mismas.

Su principal limitación reside en que la alta temperatura necesaria para efectuar el proceso (900÷1000 °C) y los condicionantes técnicos del mismo, exigen para la mayor parte de los aceros un tratamiento térmico posterior, generalmente en horno a alto vacío. También pueden producirse deformaciones en las piezas debido a las altas temperaturas del proceso.

### ***2.3.1.2. Proceso TD (Toyota Difusion)***

Como el nombre del método indica, este proceso es de patente japonesa de la marca Toyota. El método se basa en la obtención de un ion contenido en el seno de un baño fundido, el cual reacciona con el carbono (C) del acero para formar el carburo correspondiente. El proceso exige temperaturas de aplicación semejantes a las del CVD.

El baño fundido se encuentra entre 900÷1000 °C. Está compuesto por bórax al cual se adicionan diversas proporciones de ferroaleaciones de los elementos a implantar y de los cuales queremos conseguir diferentes carburos.



Básicamente obtenemos capas compuestas de:

- **Carburos de vanadio (VC)**
- **Carburos de niobio (NbC)**
- **Carburos de cromo ( $Cr_7C_3$ )**

Este método tiene la enorme ventaja de su simplicidad y por consiguiente menores costos, aún teniendo sus propias limitaciones como consecuencia de la temperatura del proceso.

Estas temperaturas nos obligan a un tratamiento térmico posterior que puede ser inmediatamente después del recubrimiento y no necesita un horno de alto vacío. Pueden surgir deformaciones en las piezas debido a estas altas temperaturas de proceso.

## 2.3.2. RECUBRIMIENTOS A MEDIA TEMPERATURA

### *2.3.2.1. Proceso PVD (Physical Vapour Deposition)*

La deposición física reactiva en fase vapor (PVD) de las capas duras y finas, consiste en fundir, evaporar e ionizar el metal (generalmente titanio) del que queremos obtener el recubrimiento, para reaccionar con un gas reactivo de aportación (generalmente  $N_2$ ), y depositar el producto formado sobre el sustrato.

De esta forma, pueden conseguirse capas muy duras y de espesores muy pequeños que forman los compuestos denominados:

- **Nitruro de titanio (TiN)**
- **Carbonitruro de titanio (TiCN)**
- **Nitruros de titanio-aluminio (TiAlN)**
- **Carburo de molibdeno (MoC)**
- **Nitruro de cromo (CrN)**
- **Nitruro de circonio (ZrN)**

El hecho de poder trabajar a una temperatura cercana o inferior a los 500 °C hace posible el recubrimiento en piezas totalmente terminadas y sin necesidad de posteriores tratamientos térmicos o rectificadas ya que no se producen deformaciones ni cambios en la microestructura del material. Las piezas deben poder mantener su dureza original a estas temperaturas.

### 2.3.3. RECUBRIMIENTOS A BAJA TEMPERATURA

Dentro de esta gama de recubrimientos encontramos los siguientes tipos:

- **Cromo duro.**
- **Níquel químico.**
- **Implantación iónica.**
- **Proyección térmica.**

## 3. RECUBRIMIENTOS PVD (Physical Vapour Deposition)

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Las capas producidas por el proceso PVD (Physical Vapour Deposition) se depositan como se ha explicado anteriormente a través de diferentes métodos y a **temperaturas cercanas a los 500 °C** para los aceros y temperaturas superiores para los carburos (metal duro).

Esta es una de las características más importantes de este tipo de recubrimiento, ya que en ciertos aceros (p. ej. 1.2379), que han sido revenidos correctamente como mínimo dos veces por encima de los 500 °C, no aparece **casi ninguna deformación** o cambio de medida. En esta ventaja radica la gran aceptación y divulgación a las capas de PVD, sobre todo en herramientas de corte de acero rápido (HSS).

Las capas finas y duras de nitruro de titanio (TiN) depositadas por la tecnología PVD, son las que tienen una aplicación comercial mucho más



amplia, gracias a la gran **resistencia al desgaste** que proporcionan, y que actúan como **barreras de difusión** del calor.

A principios de los años 80 se obtuvieron las primeras capas industriales, creciendo en beneficio de esta nueva tecnología dentro de la industria, aunque muchos fabricantes de herramienta de corte hayan sido reacios en principio, ya que pueden ver disminuidos sus volúmenes de producción.

Esto es debido a la **mayor capacidad de vida útil** que adquieren las herramientas de corte con los recubrimientos PVD. La aceptación ha sido conducida por la utilización de nuevos materiales base con exigencias de una **productividad mayor** para las herramientas de coste elevado de máquinas de alto rendimiento y control de mecanizado.

Este tipo de recubrimiento necesita una cuidadosa preparación de las piezas o superficies a recubrir, por lo tanto hay que **limpiar escrupulosamente y acondicionar minuciosamente** las superficies antes de comenzar el proceso.

A causa del vacío intenso exigido, existe un gran peligro de introducción de oxígeno a través del aire o contaminación del material, alterado mediante gasificaciones o desgasificaciones de la superficie o paredes del reactor, que puede provocar una disminución fuerte de la adherencia de la capa PVD, provocado por la oxidación de la superficie de la pieza a recubrir.

Las superficies de fundición brutas o superficies ásperas, presentan un efecto negativo. Si existen microgrietas por regla general invisibles o poros de



fusión entreabiertos, la capa PVD queda alterada a menudo por desgasificaciones locales con el correspondiente problema de adherencia del recubrimiento.

Por ello, el requisito fundamental para la técnica del recubrimiento PVD es el que las herramientas de corte o superficies de piezas que tienen que ser recubiertas lleguen a este proceso sin defectos superficiales. Cuanto más pulida está la superficie a recubrir, siempre existirá una mayor adherencia.

### **3.2. TECNOLOGÍA DEL RECUBRIMIENTO PVD**

Los recubrimientos obtenidos por el proceso PVD, pueden conseguirse con distintos sistemas de evaporación. Los distintos métodos PVD consisten genéricamente en evaporar un metal puro o aleación por medios físicos en una cámara, donde previamente se obtiene un grado de vacío muy elevado (aproximadamente  $10^{-4} \div 10^{-5}$  mbar.).

Una vez evaporado el metal o aleación al entrar en contacto con un gas reactivo en medio plasmático, forma el compuesto que se desea implantar sobre la superficie a recubrir. Este compuesto es proyectado contra las piezas por acción de la diferencia de potencial (200÷400 V) que existe entre las piezas o herramientas a recubrir y la cámara. Al entrar en contacto con el sustrato, el producto gaseoso formado se condensa sobre él.

Las reacciones entre el vapor del metal y el gas reactivo se llevan a cabo en una cámara (reactor), introduciendo dicho gas con una presión muy



reducida del orden de  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar, donde existe una atmósfera de iones y electrones en igual proporción (plasma) con carga eléctrica global nula.

El metal evaporado (generalmente titanio) y la introducción del gas reactivo (generalmente nitrógeno), originan un flujo de partículas activadas de nitruro de titanio ( $\text{TiN}^+$ ), de gases ionizados ( $\text{N}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ), y de átomos neutros que se aceleran hacia el substrato por la aplicación de una polarización negativa al mismo.

Al encontrarse esta corriente gaseosa (vapor) con el substrato polarizado, se produce la condensación de los átomos de TiN formándose las primeras capas del compuesto, los cuales crecen después por coalescencia y por la aportación de nuevos átomos e iones que llegan continuamente.

Existen distintos sistemas o técnicas de evaporación, entre ellas se utiliza el efecto Joule, el bombardeo electrónico, la inducción, el arco eléctrico, ...

Las piezas antes de empezar la etapa de recubrimiento suelen ser calentadas a temperaturas cercanas a los  $500\text{ }^\circ\text{C}$  para conseguir una adherencia aceptable de la capa dura sobre el substrato.

El gran interés tecnológico del sistema PVD reside en la posibilidad de operar por debajo de los  $500\text{ }^\circ\text{C}$  y por tanto sobre piezas totalmente terminadas, por lo tanto no hay que efectuar ningún tipo de tratamiento térmico posterior.

### **3.3. SISTEMAS DE EVAPORACIÓN**

Existen diversas variantes de la técnica PVD basadas principalmente en los medios utilizados para producir la evaporación del metal a aportar para realizar un recubrimiento. Estos medios sirven para diferenciar los procesos y son:

- 1. Evaporación térmica.**
  - **Por inducción o resistencias (efecto Joule).**
  - **Por cañón de electrones (bombardeo electrónico).**
  - **Por láser.**
- 2. Sistema “Sputtering” o pulverización catódica con magnetrón.**
- 3. Evaporación por arco.**
  - **Con acelerador magnético.**
  - **Directo o por aislamiento del cátodo.**

#### **3.3.1. EVAPORACIÓN TÉRMICA DEL METAL**

Este sistema consiste en aumentar la temperatura de metal de aportación contenido en un crisol situado debajo del substrato, hasta lograr que este se vaporice y quede suspendido en el vacío como vapor del metal que formará el recubrimiento.

Existen diversos tipos de evaporación térmica y se diferencian básicamente en la forma de conseguir que el metal aumente de temperatura, para ello tenemos tres tipos diferentes de sistemas:



### ***3.3.1.1. Por inducción o resistencias.***

Hacemos circular una corriente eléctrica a través de unas bobinas o unas resistencias que provocan el calentamiento del crisol hasta superar la temperatura de fusión del metal y conseguir que este se vaporice (fase gaseosa). Actualmente no esta en uno industrial.

### ***3.3.1.2. Por cañón de electrones.***

La evaporación del metal está producida por el calentamiento generado por un haz de electrones (cañón electrónico), donde la energía cinética se convierta en calor al chocar estos contra el metal. La función del haz de electrones es:

- *Calentar y fundir el metal vaporizándolo.*

La activación se consigue mediante un electrodo polarizado colocado dentro del plasma, entre el sustrato y la fuente.

### ***3.3.1.3. Por láser.***

Tiene un funcionamiento similar al anterior con la particularidad que se proyecta un rayo láser sobre la superficie del metal, provocando que este se caliente y aumente la temperatura hasta llegar a vaporizar el metal o aleación que formará parte del compuesto del recubrimiento. Actualmente este sistema no esta en uso.



### **3.3.2. SISTEMA “SPUTTERING” O MAGNETRÓN.**

La vaporización del metal a implantar se produce por la expulsión de los átomos superficiales de una placa del citado metal (cátodo) que se proyectan sobre el substrato colocado bajo la fuente.

La expulsión superficial del metal evaporado se debe la aceleración de iones no reactivos ( $\text{Ar}^+$  por ejemplo) para extraer el metal a implantar de la fuente suministradora la cual está sometida a un fuerte potencial negativo para crear el régimen de descarga luminiscente necesario para las reacciones en fase gaseosa.

Para aumentar el rendimiento de la pulverización se emplean campos magnéticos aplicados transversalmente a la dirección del campo eléctrico en la superficie de la placa que constituye la fuente (cátodo). Un sistema de estas características recibe es nombre de pulverización catódica con magnetrón.

Este sistema crea un campo magnético, el cual hace que los electrones que se desprenden del metal de aportación para el recubrimiento circulen de norte (N) a sur (S), de manera que choquen con el metal y se consigue que erosionen aún más el metal de aportación.

### **3.3.3. EVAPORACIÓN POR ARCO.**

Con este sistema tenemos el metal o aleación de aportación del recubrimiento en forma sólida y con una determinada forma llamada “cátodo” ya que esta polarizado negativamente.

Para poder llegar a la evaporación, se hace saltar una chispa, mediante un sistema electrónico de cebado, creando un arco eléctrico que corre por encima del metal. Como la temperatura de un arco eléctrico es muy elevada y es muy superior a la temperatura de fusión del metal o aleación, este instantáneamente se funde y seguidamente se evapora, quedando suspendido en el vacío en forma de iones. Este sistema de evaporación por arco tiene dos variantes significativas.

### ***3.3.3.1. Con acelerador magnético.***

El sistema esta proveído de una bobina que crea un campo magnético que provoca que los iones que circulan perpendicularmente a él, cambien su trayectoria y tomen la dirección del campo magnético. Así se consigue que una mayor cantidad de iones circulen en la dirección deseada, concentrándolos en una zona determinada.

### ***3.3.3.2. Directo o por aislamiento del cátodo.***

El sistema contiene un aislamiento que mantiene el arco eléctrico en la superficie frontal del cátodo y evitando que pueda retroceder. Se consigue así, que la proyección de los iones sea directa hacia donde se desee.

## **3.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS**

Para comprender mejor las causas por las que una capa fina y dura depositada sobre la superficie de herramientas de corte, aumenta de manera considerable su duración durante la operación de corte, es conveniente primero estudiar cuales son los principales generadores de desgaste en dichas

herramientas. A velocidades de corte muy elevadas, el filo está sometido a una serie de parámetros que desgastan la herramienta:

- **Temperaturas muy altas.**
- **Grandes esfuerzos de compresión.**
- **Fricción intensa.**
- **Reacciones químicas de oxidación.**

En superficies a alta temperatura, el desgaste se produce por difusión del calor, mientras que en las que el calentamiento es menor y mayor el rozamiento el desgaste se produce por abrasión. Además de la difusión, la abrasión, y una combinación de ambas, son un problema de desgaste las reacciones químicas de algunos constituyentes del material de la herramienta con los de la pieza que se mecaniza, con las impurezas de ésta y con el oxígeno de aire.

Por lo tanto, la herramienta se deteriora progresivamente perdiendo su capacidad de corte y termina por inutilizarse. Los recubrimientos con capas finas y duras sobre las herramientas disminuyen su desgaste:

- **Actuando como una barrera de difusión.**
- **Disminuyendo la intensidad de fricción (menor coeficiente de fricción), y por ello, rebajando los esfuerzos de corte.**
- **Reduciendo la abrasión por las sustancias duras.**
- **Creando una barrera contra la interacción química.**
- **Suprimiendo la adherencia entre la herramienta y la viruta que se desprende (microsoldaduras).**



Para obtener un buen recubrimiento, las exigencias básicas de calidad tienen que establecerse tanto para el material de la herramienta como para el del recubrimiento, por lo tanto este último debe poseer:

- 1. Buena adherencia a las superficies de la herramienta.**
- 2. Estructura compacta, densa y libre de porosidad.**
- 3. Coeficiente de rozamiento pequeño con respecto al del material que se somete a las operaciones de corte.**
- 4. Dureza elevada a las temperaturas más altas de trabajo.**
- 5. Gran estabilidad química.**
- 6. De producción rápida y económica.**

A su vez, la herramienta (substrato) debe tener:

- 1. Composición química compatible con el recubrimiento.**
- 2. Buena tenacidad.**
- 3. Dureza elevada tanto en caliente como en frío.**
- 4. Coeficiente de dilatación similar al de la capa.**
- 5. Buena conductividad térmica.**
- 6. Estabilidad dimensional a las temperaturas de recubrimiento.**

Una vez realizado el recubrimiento hay que determinar:

- ◆ **Adherencia de la capa.**
- ◆ **Composición y estructura.**
- ◆ **Espesor de la capa y su uniformidad.**
- ◆ **Dureza de la capa.**
- ◆ **El color.**



- ◆ **Dureza del material base o sustrato.**

## **3.5. TIPOS DE RECUBRIMIENTOS**

### **3.5.1. CONSIDERACIONES PREVIAS AL RECUBRIMIENTO**

Para poder realizar un recubrimiento en condiciones óptimas, al recibir una herramienta hay que tener en cuenta ciertas consideraciones previas al proceso. Esto implica conocer ciertos datos propios del sustrato a recubrir.

- 1. Tipo de acero.*
- 2. Estado superficial.*
- 3. Características geométricas.*
- 4. Posible magnetización.*

#### ***3.5.1.1. Tipo de acero.***

La temperatura de obtención del recubrimiento es uno de los factores condicionantes de la clase del acero para una herramienta de corte recubierta, por lo tanto es imprescindible conocer ciertos datos importantes sobre la clase de acero el cual se recubrirá.

#### **➤ Composición del acero.**

La característica principal que debe presentar el material a recubrir es la dureza o posibilidad de ser endurecido. Toda capa dura debe poder transmitir los esfuerzos que recibe al material base sin que en él se produzcan deformaciones.

Los aceros recomendados para soportar grandes esfuerzos son:

- ❑ *Aceros rápidos.*
- ❑ *Aceros ledeburíticos, 12% Cr y equivalentes.*
- ❑ *Aceros en general con doble curva de revenido.*

➤ **Especificación de la secuencia de tratamientos previos.**

Toda pieza antes del recubrimiento PVD se debe haber tratado térmicamente, según:

- ❑ *Temple.*
- ❑ *Doble revenido como mínimo a temperatura superior a la del recubrimiento.*

**3.5.1.2. Estado superficial.**

La pieza a recubrir tiene que estar completamente acabada, rectificada y pulida. Debido al pequeño espesor de las capas duras, éstas tienden a copiar la rugosidad superficial.

Cuanto más fino sea el acabado, mejores coeficientes de fricción se conseguirán en la pieza recubierta. Además el aspecto, color y brillo son en general más atractivos.

Si el acabado superficial no es bueno se dificulta la adherencia y el rendimiento de la herramienta no será el esperado. El acabado de una

herramienta suele ser por rectificado o por electroerosión, y en ambos casos pueden aparecer deterioros superficiales:

➤ **Defectos debidos al rectificado.**

- ❑ *Zonas oxidadas por efecto de un calentamiento excesivo producido por un abrasivo inadecuado.*
- ❑ *Zonas reblandecidas por efecto de insuficiente refrigeración y lubricación durante la fase de rectificado.*

➤ **Defectos debidos a la electroerosión.**

El proceso de electroerosión provoca una zona de metal fundido en la superficie, inmediatamente después una zona de material retemplado y progresivamente una zona afectada por el gradiente de calor que provoca hacia el interior de la pieza revenidos locales y por tanto durezas heterogéneas. Antes de recubrir con PVD deberá hacerse:

- ❑ *Doble revenido a temperatura superior a 500 °C para eliminar la zona retemplada.*
- ❑ *Eliminación por mecanizado (pulido) de la zona de metal fundido de la superficie.*

**3.5.1.3. Características geométricas.**

Las dimensiones de las piezas, desigualdades de espesores, agujeros, muescas, etc. son muy importantes, ya que pueden existir diferencias de temperatura considerables si los tamaños de las piezas no son similares.



#### *3.5.1.4. Posible magnetización.*

La posibilidad de que existan piezas magnetizadas dificulta la eliminación del polvo metálico que tienen ciertas herramientas debido al mecanizado al cual han estado sometidas.

#### **3.5.2. LIMPIEZA**

La limpieza de las piezas es muy importante, especialmente en los recubrimientos que se realizan en condiciones de alto vacío y a baja temperatura como es el caso del PVD.

Esta se realiza con disolventes y detergentes específicos para cada tipo de material y con instalaciones equipadas con ultrasonidos y secado rápido.





Sin embargo, aceites y grasas difíciles de disolverse, crean residuos sólidos adheridos sobre la pieza o con posibilidad de desgasificar con el aumento de la temperatura, dificultando los procedimientos habituales de limpieza e imposibilitando la consecución de un recubrimiento uniforme y con garantía. Los aceites con bases siliconadas producen este tipo de efectos.

La presencia de corrosión u oxidación no permite la adherencia de los compuestos recién formados. Las zonas de corrosión deben ser eliminadas por medios mecánicos. La manipulación de una herramienta acabada y en algunos casos con zonas de trabajo muy afiladas, es siempre muy compleja y pese a los cuidados minuciosos del operador, comporta un cierto riesgo de provocar cortes.

La presencia de oxidación especialmente en piezas afiladas o rectificadas deficientemente se observa en los tonos azulados o oscuros de algunas herramientas de corte (p. ej. machos de roscar). El mismo efecto se produce en herramientas pavonadas o tratadas con recubrimientos antifricción.

Cabe destacar que una pieza que presente un recubrimiento homogéneo sin manchas ni defectos (aunque éstos se produzcan en zonas que no afectan al trabajo de la herramienta) ofrece visualmente mejor garantía de un correcto recubrimiento. Es por ello que se recomienda un acabado superficial óptimo en toda pieza a recubrir, y no solo en la superficie o zona de sollicitación del recubrimiento.

### 3.5.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS DIFERENTES CAPAS

Las herramientas de corte como son las herramientas de mecanizado o de arranque de viruta, punzonado, matricería de corte fino exigen en muchos casos tolerancias centesimales, y por lo tanto no se pueden obtener deformaciones y se exige un recubrimiento a baja temperatura como el PVD.

Las capas obtenidas en este tipo de recubrimiento suelen ser del orden de entre las 2 ÷ 3  $\mu\text{m}$ . de espesor. Capas de espesor superior provocan el defecto del redondeo de las aristas vivas tan importantes en toda herramienta de corte, que pueden provocar el efecto de un corte de peor calidad y una duración inferior de la herramienta.

#### *3.5.3.1. Recubrimiento basado en nitruro de titanio (TiN)*

Los compuestos duros de uso más generalizado, obtenidos por PVD, son los de titanio. El compuesto de nitruro de titanio (TiN) es el pionero y el de aplicación universal. Posteriormente se han desarrollado capas duras basadas en otros metales puros y dopados. Aún hoy en día es el recubrimiento con mayor número de aplicaciones.

#### *Características del TiN*

<i>Dureza</i>	<i>2100 , 2500 HV</i>
<i>Coefficiente de fricción medio</i>	<i>0.65</i>
<i>Temperatura de oxidación</i>	<i>400 °C</i>

### ***3.5.3.2. Recubrimiento basado en carbonitruro de titanio (TiCN)***

El carbonitruro de titanio (TiCN) es un compuesto de dureza superior al TiN y por tanto con mayor resistencia al desgaste. En operaciones de arranque de viruta supera, en condiciones de velocidad y avance adecuadas, el rendimiento del TiN. Sin embargo, para aleaciones blandas el rendimiento suele ser inferior al que consigue el TiN.

#### ***Características del TiCN***

<i>Dureza</i>	<i>3100 , 3200 HV</i>
<i>Coefficiente de fricción medio</i>	<i>0.55</i>
<i>Temperatura de oxidación</i>	<i>300 °C</i>

### ***3.5.3.3. Recubrimiento basado en nitruro de titanio-aluminio (TiAlN)***

Los recubrimientos dopados basados en el nitruro de titanio han permitido mejorar sus propiedades. La incorporación de aluminio en proporciones determinadas permite, no solo un considerable aumento de dureza, sino una mayor estabilidad térmica, con el consiguiente aumento del rendimiento de las herramientas condiciones más severas a las habituales para el TiN.

Se precisa que el metal base no pierda las propiedades de dureza con el aumento de temperatura que supone incrementar avances y velocidades de corte, por lo tanto, el óptimo rendimiento se obtiene sobre metal duro, ya que el acero perdería las propiedades de dureza al aumentar la temperatura de la herramienta.

### *Características del TiAlN*

<i>Dureza</i>	<i>4000 , 4300 HV</i>
<i>Coefficiente de fricción medio</i>	<i>0.70</i>
<i>Temperatura de oxidación</i>	<i>800 °C</i>

### *3.5.3.4. Recubrimiento basado en carburos de molibdeno (MoC)*

La aportación de compuestos de molibdeno a las herramientas no proporciona un aumento significativo de dureza respecto al TiN, la mejora se aprecia en la disminución del coeficiente de fricción gracias a la oxidación de los compuestos de molibdeno que generan compuestos autolubricantes.

### *Características del MoC*

<i>Dureza</i>	<i>1500 , 2000 HV</i>
<i>Coefficiente de fricción medio</i>	<i>0.35</i>
<i>Temperatura de oxidación</i>	<i>300 , 400 °C</i>

### *3.5.3.5. Recubrimiento basado en nitruro de cromo (CrN)*

Los recubrimientos de nitruro de cromo (CrN) están incrementando su popularidad especialmente en Japón y Estados Unidos. La mayor velocidad de crecimiento de la capa, sus excelentes prestaciones a elevadas temperaturas y la mayor resistencia a la corrosión han conseguido que el CrN se esté introduciendo con éxito como recubrimiento en piezas de construcción para la industria del automóvil.

### *Características del CrN*

<i>Dureza</i>	<i>2500 HV</i>
<i>Coefficiente de fricción medio</i>	<i>0.50</i>
<i>Temperatura de oxidación</i>	<i>600 °C</i>

### **3.5.4. APLICACIONES DE LAS DIFERENTES CAPAS**

Se presentan a continuación algunos ejemplos de las aplicaciones en que se aportan recubrimientos PVD para aumentar el rendimiento de la herramienta:

➤ **Punzones de corte, punzones centradores. Matrices de corte fino.**

<i>Material</i>	<i>Acero rápido (HSS). Acero de trabajo en frío. (F-520 A)</i>
<i>Dureza</i>	<i>62, 63 HRC (HSS). 59, 61 HRC (F-520 A)</i>
<i>Recubrimiento</i>	<i>TiN, TiCN</i>
<i>Espesor</i>	<i>2, 3 mm.</i>

➤ **Fresas, escariadores, machos de roscar, brocas. Plaquetas de metal duro.**

<i>Material</i>	<i>Acero rápido (HSS). Metal duro</i>
<i>Dureza</i>	<i>63, 64 HRC (HSS). &gt;70 HRC (metal duro)</i>
<i>Recubrimiento</i>	<i>TiN, TiCN, MoC, CrN</i>
<i>Espesor</i>	<i>2, 3 mm.</i>

- **Fresas y plaquetas de metal duro para mecanizar aceros y aleaciones tratadas a alta velocidad.**

<i>Material</i>	<i>Metal duro</i>
<i>Dureza</i>	<i>&gt;70 HRC</i>
<i>Recubrimiento</i>	<i>TiAlN</i>
<i>Espesor</i>	<i>2, 3 mm.</i>

- **Moldes de inyección de plástico y aleaciones metálicas de bajo punto de fusión.**

<i>Material</i>	<i>Acero inoxidable (AISI 420). Acero de trabajo en caliente (F-5318)</i>
<i>Dureza</i>	<i>48, 50 HRC</i>
<i>Recubrimiento</i>	<i>TiN, CrN</i>
<i>Espesor</i>	<i>3, 5 mm.</i>

### **3.6. ESTADO ACTUAL DEL DESARROLLO COMERCIAL**

Es importante establecer la función actual y las expectativas del recubrimiento del nitruro de titanio (TiN) ya que este es el buque insignia de la tecnología PVD.

Como hemos anunciado anteriormente, hay muchos sistemas PVD, donde la variación más importante en estos sistemas, es el método de producción del vapor de titanio. Dentro de cada uno de estos métodos hay



diferentes firmas comerciales que producen recubrimientos PVD y cada cuál usa parámetros de proceso y configuraciones muy diferentes que deben conducir inevitablemente a variaciones en el resultado final del recubrimiento.

El hecho de que existan diferentes firmas comerciales que realizan recubrimientos PVD con distintos métodos, trae como consecuencia que la adherencia de la capa del recubrimiento con el sustrato sea bastante diferente, aunque las capas finas de TiN tengan microestructuras relativamente similares.

En parte, estas diferencias se pueden atribuir a las diferencias en los procedimientos anteriores al tratamiento de PVD tales como, la limpieza de las piezas o superficies a recubrir y en el precalentamiento de las piezas.

Los efectos de las variaciones de temperatura del sustrato también afectan la estequiometría de los recubrimientos. Otro aspecto esencial del proceso PVD es la asistencia de un plasma controlado por un voltaje. Este parámetro juega un papel importante para determinar el grado de tensión residual interna y por lo tanto la dureza del recubrimiento.

Las propiedades del recubrimiento PVD dependen de la naturaleza del proceso de deposición pero más evidentemente de los parámetros utilizados según el método de recubrimiento. Entre los diferentes sistemas de evaporación del metal, la evaporación por arco da origen a una aspereza (rugosidad) más alta en la superficie del recubrimiento debido a la emisión de una gota.

En un estudio realizado en el National Centre of Tribology sobre el rendimiento de PVD en el recubrimiento de herramientas de corte con TiN, se





encontró que varía significativamente dependiendo entre otras cosas, de la firma comercial del recubrimiento, y por lo tanto del sistema utilizado.

Por supuesto, los otros parámetros que pueden afectar al rendimiento son la variabilidad de los tipos de herramientas de corte, desde el punto de vista de la geometría y la microestructura.

Consiguientemente, uno no debería sorprenderse demasiado al encontrar que algunos de los recubrimientos PVD de la “próxima generación” funcionan mejor que el recubrimiento de TiN.

### **3.7. PRÓXIMA GENERACIÓN DE RECUBRIMIENTOS**

La próxima generación de recubrimientos PVD de importancia después del TiN, son el carbonitruro de titanio (TiCN) y el nitruro de titanio-aluminio (TiAlN).

Estos recubrimientos son de mucha importancia comercial en los mercados Europeos, Norteamericanos y Asiáticos. El reclamo para el rendimiento superior del TiCN sobre el TiN en el corte continuo está basado en las características más inferiores de rozadura y mejores coeficientes de transmisión del calor.

Probablemente la razón de una salida al mercado más lenta del TiCN como un recubrimiento PVD de importancia, es relativo a las dificultades del proceso, específicamente controlando la estequiometría y tensión residual, y eligiendo el apropiado gas de transportador de hidrocarburos.



Igualmente, el rendimiento de los recubrimientos distintos del TiN en herramientas de corte varía ampliamente según las diferentes firmas comerciales y los diferentes procesos utilizados.

El nitruro de titanio-aluminio (TiAlN) tiene una tendencia al alza de forma espectacular, debido sobretodo a la mejora de sus propiedades. La incorporación del aluminio permite un aumento de la dureza de la capa y una mayor estabilidad térmica, aumentando la temperatura de oxidación de forma considerable.

Si se mira más allá del futuro inmediato, aparece que la tecnología PVD tiene mucho que ofrecer. Una gama amplia de compuestos binarios y ternarios que pueden incorporarse en unas proporciones determinadas, pueden dar solución a muchos problemas o crear nuevos tipos de capas duras y finas que comercialmente pueden tener mucho éxito.

### **3.8. CONCLUSIÓN**

Desde el punto de vista del recubrimiento PVD para herramienta de corte, aparece una nueva gama de recubrimientos que surgirá con fuerza en los próximos años. La tecnología del PVD tiene la suficiente potencialidad como para ofrecer una variedad muy amplia de recubrimientos, apareciendo nuevas propiedades.

A pesar de este desarrollo inevitable, es importante reconocer la variabilidad amplia en el rendimiento del proceso PVD para herramientas de corte, debido al método de deposición de vapor y los parámetros diferentes que se involucran en el proceso.



El sistema de recubrimientos en base a la tecnología de la evaporación por arco, ofrece una gama más amplia de recubrimientos tales como nitruro de titanio (TiN), carbonitruro de titanio (TiCN), nitruros de titanio-aluminio (TiAlN), nitruro de circonio (ZrN), y nitruro de cromo (CrN).

Las ventas importantes están actualmente en el TiN y el TiCN teniendo en cuenta el crecimiento que sufre actualmente el TiAlN. La tecnología de recubrimiento por arco es la tecnología PVD con la potencialidad para el desarrollo a causa de los altos niveles de ionización y mitiga con que las multicapas pueden desarrollarse perfectamente.

## **4. EVAPORACIÓN POR ARCO**

### **4.1. CAPAS PVD OBTENIDAS POR EVAPORACIÓN POR ARCO**

Se presenta a continuación una tecnología llamada “*evaporación por arco*” del proceso PVD, que fue desarrollado en el Centro Tecnológico de Recubrimientos de Metales (CMTM) de Moscú y adaptado posteriormente por la compañía americana MULTIARC-ION BOND, el cual basa la evaporación y obtención de los iones del metal a implantar en el efecto que produce un arco voltaico sobre el cátodo de este material.

El arco se desplaza sobre la superficie del cátodo. Durante el proceso, se evapora una cantidad de metal proporcional a la intensidad de la corriente del arco. El metal evaporado ionizado es acelerado en la dirección de las piezas a recubrir (polarizadas negativamente) y reacciona con los gases



reactivos introducidos dentro de la cámara ( $N_2$ ,  $C_2H_2$ , ...) para formar los depósitos duros.

Los iones, una vez generados son proyectados sobre las piezas a recubrir por acción de una diferencia de potencial entre estas y el cátodo. La energía cinética de los iones se transforma en calorífica durante el choque con la pieza, hecho que mantiene la temperatura adecuada durante la fase de recubrimiento.

Gracias a esta tecnología, se obtienen capas de un espesor de 2 a 3  $\mu m$ ., con una característica muy importante y definitoria de este tipo de recubrimientos, como es el aumento de la resistencia al desgaste de las herramientas recubiertas durante su trabajo y en condiciones extremas.

La naturaleza de la atmósfera del gas reactivo introducida en el reactor, a muy baja presión (del orden de  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar), permite obtener uno u otro tipo de compuestos. La versatilidad de cambio de cátodos y gases reactivos facilita la obtención de capas dopadas y multicapas. Con ello se puede mejorar las propiedades de las capas simples convencionales.

La posibilidad de obtener recubrimientos PVD multicapas, es muy importante para combatir mejor las diferentes causas del desgaste y de la corrosión, aumentando al mismo tiempo el efecto de la “barrera térmica” del recubrimiento y las propiedades mecánicas del material compuesto por substrato / recubrimiento.



Mediante la tecnología PVD por evaporación por arco se pueden recubrir una gran variedad de materias con una buena uniformidad y una adherencia al substrato muy elevada.

Como se ha explicado en apartados anteriores, esta tecnología posee un potencial de expansión industrial muy importante dentro de diferentes sectores de la industria de herramientas y de matrices, debido a la simplicidad del procedimiento.

## **4.2. TECNOLOGÍA DE LA EVAPORACIÓN POR ARCO**

Durante el proceso de recubrimiento de piezas, en el interior de la cámara del reactor tiene que existir una generación, ionización y transporte del plasma del metal hasta la superficie de las piezas, donde se condensa formando el compuesto deseado según el tipo de gas reactivo utilizado y material del cátodo.

Se establece que para la evaporación por arco en el vacío existe una corriente crítica por sobre la cual la descarga es estable. La fuerza de esta corriente descansa en grandes límites y depende del material del cátodo y los parámetros del circuito eléctrico. A una corriente de descarga mayor a la crítica la velocidad de erosión del cátodo es proporcional a la fuerza de la corriente.

### **4.2.1. TRANSPORTE DEL PLASMA**



La interacción de los iones con la superficie del metal a recubrir se caracteriza por una gran cantidad de fenómenos físicos diferentes cuyos estudios cuentan con abundante literatura y publicaciones.

El análisis de la influencia de diferentes factores sobre la interacción de las partículas con la superficie indica que el resultado de tal acción se determina por el estado energético y de carga de la partícula, su composición química, densidad y ángulo de incidencia del flujo plasmático, al igual que la composición química del sustrato, su estructura cristalográfica, la forma de las caras superficiales, la composición y estructura de la capa absorbida, la rugosidad superficial, su temperatura, potencial y la posibilidad de ejecución en ella de reacciones químicas.

El flujo de plasma del metal, acelerado e ionizado obtiene una aceleración adicional cerca de la base, producto de la corriente negativa a que esta está sujeta e, incidiendo sobre ella, la calienta. Teniendo en cuenta la energía del ion se puede establecer la energía cinética de este en el momento del choque con la superficie. El calentamiento del sustrato en este caso se produce debido a la liberación de la energía cinética y potencial de las partículas.

La incidencia inicial que se relaciona con el intercambio energético puede traer consigo la incrustación de la partícula, el pulverizado de la superficie, la reflexión ó captación de esta partícula por la superficie. Al incrustarse en la superficie del sustrato las partículas apartan los átomos del material, los cuales, a su vez, provocan el desplazamiento de los átomos vecinos. Como resultado a lo largo de la trayectoria de los átomos incrustados se forman cadenas de defectos. El ion que choca, sufre una sucesión de



choques elásticos con los átomos del material perdiendo en el acto de choque una cierta energía.

El mecanismo de pulverización posee un carácter de impulsos y juega un papel importante en la preparación de la superficie para el recubrimiento. La pulverización de la superficie, llamada igualmente activación iónica, se efectúa con iones del mismo material que se utilizará para formar el recubrimiento. Para la obtención de recubrimientos de metales puros ó aleaciones se utilizan cátodos con las correspondientes composiciones de fases ó cátodos de diferentes metales puros.

El aumento de la velocidad de crecimiento de la capa con el aumento de la corriente de descarga se relaciona con el crecimiento de la cantidad de metal que se desprende de la superficie del cátodo.

#### **4.2.2. FORMACIÓN DE LA CAPA**

Durante el recubrimiento en vacío los nitruros se obtienen inyectando en la cámara nitrógeno a través del dosificador, con el cual se regula la presión de gas en la cámara. La regulación por separado de la cantidad de metal y de nitrógeno al igual que la posibilidad de regular las condiciones energéticas hacen insustituible este método para la obtención de nitruros estequiométricos ó de la composición que se desee.

Durante la obtención de nitruros con ayuda de una instalación de plasma aparece la cuestión de donde se efectúa la reacción del metal con el nitrógeno: en la superficie del metal ó en la cámara de vacío del reactor. Se



conoce que el ion del metal reacciona con el nitrógeno como resultado de los choques con otras partículas.

A favor de las conclusiones sobre la reacción de los nitruros en la superficie de condensación se manifiesta igualmente la correlación de magnitudes de microdureza, la energía de los iones y la temperatura de la base. Estas conclusiones se corresponden con el punto de vista de los investigadores que opinan que la reacción en la fase de vapor es poco probable debido a los problemas que surgen con la conservación del impulso y la disipación del calor de reacción.

Con el envío de nitrógeno a la cámara de vacío este se absorbe en la superficie de condensación. Aparte de las moléculas de nitrógeno en la superficie de condensación va a caer igualmente nitrógeno en estado atómico, el cual se forma mediante la disociación del nitrógeno molecular como resultado de los choques con los iones del metal y los electrones.

Al mismo tiempo la densidad del flujo de nitrógeno atómico que llega a la superficie de condensación es limitada por el número de moléculas disociadas producto de los choques que surgen entre el cátodo y la base. De esta manera a pequeñas presiones a la superficie de condensación llega en lo fundamental el nitrógeno en forma molecular.

La molécula de nitrógeno que es absorbida en la superficie de condensación provoca la formación de nitruro producto de la quimioadsorción mediante la aparición de dos enlaces covalentes metal- nitrógeno.



Desde posiciones energéticas el segundo método de obtención de nitruros estequiométricos ó de composición dada. Supongamos que la superficie de condensación se encuentra a temperatura estacionaria  $T_1$ . Si se dirige hacia ella un chorro de iones del metal, entonces en la superficie se libera una energía.

La cantidad de nitrógeno que entra a reaccionar con el metal va a crecer linealmente con el aumento de la energía de los iones del metal hasta que todo el nitrógeno molecular no reaccione. El aumento posterior del contenido del no metal en el nitruro será posible solo a costa de la entrada de nitrógeno atómico.

De esta manera el contenido de gas en el nitruro se determina por la presión de nitrógeno en la cámara, por la energía de los iones del metal y por la temperatura de la base. Sabiendo la temperatura de la base y escogiendo la presión de nitrógeno en la cámara, se puede encontrar la energía de los iones del metal necesaria para la formación del nitruro de composición estequiométrica.

### **4.3. INCONVENIENTES**

Esta tecnología sufre una serie de inconvenientes o dificultades que limitan su aplicación:

- **Insuficiente control del arco.**
- **Mala estructura del recubrimiento (formación de pequeñas gotas).**
- **Heterogeneidad entre cargas.**



- **Automatización insuficiente del control de los parámetros del proceso.**
- **Necesidad de una limpieza y pulido excepcional en las piezas a recubrir.**

Las superficies de pequeñas dimensiones presentan una serie de desventajas:

- **Una carga térmica localizada muy elevada.**
- **Una variación más grande de los parámetros del proceso.**

#### **4.4. CONTROL DE CALIDAD DE LAS CAPAS OBTENIDAS**

La garantía de una mejor calidad de capas PVD es función de la severidad de su control. A este fin, se requiere el control directamente sobre las piezas recubiertas y sobre los evaporadores, localizados sistemáticamente con las piezas dentro de la carga.

Dos tipos de controles son esencialmente útiles:

- **El ensayo con Calotest.**
- **El ensayo Rockwell C.**

Con el ensayo Calotest es posible controlar muy cuidadosamente el espesor, la adherencia y la calidad en el interior de la capa.



Con el ensayo Rockwell C se controla con la ayuda de un microscopio óptico las huellas obtenidas examinando esencialmente la circunferencia externa.

Ello posibilita controlar la adherencia de un depósito o substrato y la calidad de las capas depositadas.

En estos últimos años se ha podido comprobar la existencia de relaciones entre las fisuras del borde de la huella, la adherencia de los depósitos y el rendimiento en la producción industrial de piezas recubiertas con el sistema PVD.





## **5. INSTALACIÓN DE RECUBRIMIENTOS PVD**

Una instalación de recubrimientos PVD está compuesta básicamente por:

- **Un reactor de recubrimientos**
- **Un equipo completo de vacío**
- **El sistema de gases**
- **Sistemas eléctricos y electrónicos**
- **Paneles de control**

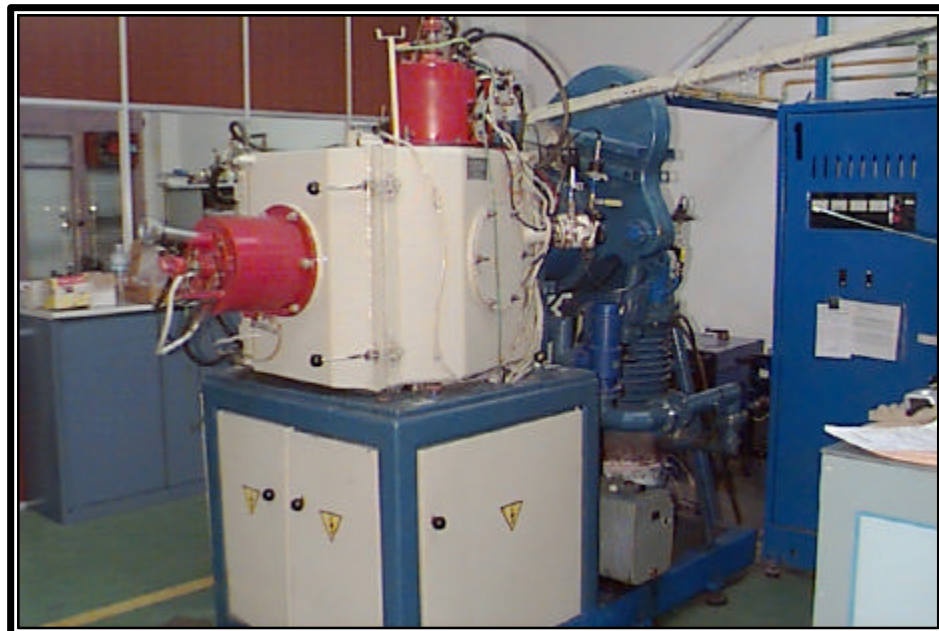
### **5.1. REACTOR**

El reactor de recubrimientos es la parte más importante dentro de una instalación de recubrimientos y esta compuesto por las siguientes partes:

- 1. Cámara**
- 2. Sistema planetario para el giro de las piezas**
- 3. Evaporadores**
- 4. Mirillas de control**

#### **5.1.1. CÁMARA**

La cámara del reactor es la zona donde se introducen las piezas a recubrir de tal manera que estas se mueven continuamente dentro de ella gracias a un sistema planetario existente. Las piezas se colocan en unos útiles o platos de sujeción adecuados y contruidos según las necesidades y estos se introducen dentro de la cámara en unos orificios diseñados para tener la posibilidad de poder girar continuamente gracias al sistema planetario.



Durante el proceso de recubrimiento se consigue un alto vacío dentro de la cámara, por lo tanto tiene que estar herméticamente cerrada y sin la posibilidad de dejar entrar aire dentro, ya que el oxígeno contenido por este nos oxidaría las piezas, que durante la fase de recubrimiento están a una temperatura que oscila los 500 °C.



Las paredes del reactor o cámara tienen interiormente un circuito por donde circula un caudal de agua sobre la cual se puede regular la temperatura de esta a través de un termostato.

De esta manera se consigue una doble función; en primer lugar refrigerar la cámara durante el proceso de recubrimiento, y posteriormente para evitar la condensación de humedad, calentar dichas paredes a la hora de abrir el reactor y realizar el cambio de carga para un posterior proceso. El agua caliente facilita la desgasificación de las paredes de la cámara.

### **5.1.2. SISTEMA PLANETARIO**

Para poder recubrir y obtener por lo tanto el espesor de capa deseado en una herramienta de corte o cualquier tipo de pieza de forma uniforme por toda su superficie, se necesita de un sistema dinámico de engranajes que permita la rotación de las piezas dentro de la cámara.

Para ello, se utiliza un mecanismo planetario que permite un doble giro de las piezas; un primer giro alrededor del eje central del mecanismo y otro segundo giro alrededor de su propio eje.

El mecanismo se mueve a través de un reductor y de un motor eléctrico donde se puede regular la tensión de tal forma que podemos aumentar o disminuir la velocidad de giro, parar e invertir el sentido de marcha cuando se desea.

### **5.1.3. EVAPORADORES**



Existen diferentes métodos de evaporación del metal a implantar en una capa dura y fina creada por el método PVD. En la evaporación por arco los evaporadores son la parte fundamental de la instalación PVD. Estos contienen el cátodo del metal del cual se formará el compuesto del recubrimiento y son los encargados como su nombre indica de evaporar el metal.

Podemos encontrar entre tres y seis evaporadores según el tipo de reactor, lo que permite la posibilidad de tener cátodos de diferentes metales en ellos y obtener así capas dopadas con mayores características y propiedades que una capa simple. Los evaporadores están colocados en las paredes de la cámara del reactor, y su número está en función del diseño de la cámara.

Los evaporadores van refrigerados por agua, para extraer la elevada temperatura que alcanza el cátodo durante el proceso de recubrimiento debido a que por encima de él corre un arco voltaico constantemente. Una bomba es la encargada de hacer circular el agua con un caudal determinado para conseguir la perfecta refrigeración.

#### **5.1.4. MIRILLAS DE CONTROL**

Existen unos orificios de pequeño diámetro para poder realizar la comprobación óptica del proceso. En estos orificios y a través de unos cristales contruidos para este fin, se puede controlar ciertos parámetros del proceso, como son:

- Comprobación de la temperatura mediante un pirómetro.
- Control del plasma y la entrada de gases.
- Posibles defectos en el recubrimiento de las piezas.



## **5.2. EQUIPO DE VACÍO**

El equipo de vacío de la instalación de recubrimientos PVD esta compuesto por diferentes sistemas. Según el grado de vacío que se va obteniendo se ponen en marcha los distintos medios que se utilizan. Básicamente se utilizan unas bombas de vacío y una serie de válvulas electromagnéticas y compuertas herméticas.

### **5.2.1. BOMBA PRIMARIA O PREVIA**

Se trata de una bomba de vacío que nos permite pasar de presión atmosférica a una presión de  $2,5 \cdot 10^{-1}$  mbar. Primeramente una válvula electromagnética permite que esta bomba actúe aspirando a través de un filtro hasta una determinada presión, seguidamente abrimos otra válvula que permite la absorción a través de otro conducto.

### **5.2.2. BOMBA DIFUSORA**

Una vez se ha llegado al grado de vacío necesario, se cierran las válvulas de la bomba previa, y se abre el circuito de alto vacío abriendo posteriormente una válvula que comunica un pequeño conducto con la bomba difusora.

Este tipo de bomba absorbe las partículas del aire gracias al efecto Venturi que se produce dentro de ella, el aceite vaporizado se desplaza a gran velocidad arrastrando las partículas de aire y debido una diferencia de densidades se separan sacando a través de la bomba previa las partículas de aire.





Finalmente se abre la compuerta hermética que conecta directamente la cámara del reactor con la bomba difusora y permite la obtención de un vacío del orden de  $10^{-5}$  mbar, que permite empezar el proceso de recubrimiento.

### **5.3. SISTEMA DE GASES**

En el proceso de recubrimiento, para la obtención de una capa dura y fina de un determinado compuesto se necesita de dos materias primas fundamentales. Una como hemos visto anteriormente son los cátodos del metal a implantar colocados en los evaporadores del reactor, y la otra materia fundamental para el recubrimiento es la introducción de un gas reactivo dentro de la cámara.

El sistema de gases esta compuesto por una electroválvula que regula la cantidad de gas que tiene que dejar entrar dentro de la cámara, gracias a la señal que le envía un medidor de presión de gran exactitud. La presión de gas es un parámetro muy importante y por lo tanto, tiene la posibilidad de poderse regular a voluntad del operario según la necesidad y del tipo de capa que se quiera obtener.

Existe también la posibilidad de realizar durante un mismo proceso de recubrimiento cambio de gases, permitiendo de esta manera la generación ya no solo de capas sencillas o dopadas con otros metales sino también obtener multicapas de diferentes compuestos e incluso poder obtener una serie de colores decorativos.

## 5.4. SISTEMAS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

La instalación del reactor de recubrimientos esta compuesta de una gran variedad de sistemas eléctricos y electrónicos que permiten la variación de los parámetros del proceso ya sea antes o durante la fase del recubrimiento. Entre ellos cabe destacar:

- Sistemas electrónicos de cebado del arco.
- Generadores de corriente y sistemas de regulación para los evaporadores.
- Transformador de alta tensión y sistema de regulación para las piezas.

## 5.5. PANELES DE CONTROL

Los paneles de control, contienen todos los mandos de activación y regulación de los parámetros que existen en la instalación.

- Panel de control del sistema de vacío.
- Panel de control de los evaporadores (uno para cada evaporador).





- Panel de control del motor del sistema planetario.
- Panel de control y regulación de alta tensión.
- Mandos y pantallas digitales de regulación de la presión de gas.
- Mandos de control del sistema de refrigeración por agua.

## **6. ESTADO ACTUAL DE LOS EVAPORADORES**

En la actualidad la empresa Tratamientos Térmicos Carreras S.A., dispone de tres instalaciones completas de recubrimientos PVD, y actualmente esta en proceso de fabricación de una nueva instalación.

Cada instalación de PVD está compuesta de tres evaporadores con la posibilidad de incorporar en cada una de ellas un cuarto evaporador. Están dispuestos en los laterales de la cámara del reactor y en la parte superior de esta. La nueva instalación consta de un total de hasta seis evaporadores gracias al nuevo diseño de la cámara en forma hexagonal.

En una instalación de PVD existe una única bomba que impulsa el agua necesaria para que por cada evaporador circule un cierto caudal determinado para su buena refrigeración. El agua se impulsa a través de un circuito compuesto de unas mangueras, conectadas a unas rácores de entrada y salida de agua y sujetas con unas bridas de apriete mediante un tornillo sinfín.

El agua refrigera el cátodo del evaporador, en contacto directo con la superficie posterior de este. A través de un tubo, el agua entra hasta contactar con dicha superficie y seguidamente se expande por toda ella, retornando el agua caliente por la parte exterior, a través de otro tubo concéntrico al de



entrada. Seguidamente esta misma agua entra en un circuito laberinto en la camisa exterior del evaporador.

Los evaporadores actuales están formados en dos partes independientes; una parte exterior compuesta de las bobinas y un circuito de refrigeración de la carcasa junto con los elementos de sujeción con la pared del reactor, y una parte interior que lleva consigo todas las piezas propias de sujeción del cátodo y el sistema de cebado del arco y que va atornillada a la tapa trasera de la carcasa.

Existen dos sistemas diferentes de sujeción del cátodo, tanto en un sistema como en otro, existe una junta de hermeticidad que evita las pérdidas de agua a través de las piezas que componen el sistema de sujeción, estando en contacto directo dicha junta con el cátodo.

Para la realización del cambio de cátodo, operación que se realiza con gran frecuencia debido sobretodo a la necesidad comercial de los diversos tipos de recubrimientos y al cambio por desgaste del mismo, es necesario toda una manipulación del sistema de sujeción del cátodo y del sistema de cebado del arco.

## **7. OBJETIVOS Y MEJORAS A INCORPORAR**

Después de analizar las características de los actuales evaporadores que se utilizan en la empresa Tratamientos Térmicos Carreras S.A., se ha llegado a la conclusión de que se pueden conseguir una serie de mejoras substanciales en la fabricación de un nuevo evaporador con unas características diferentes y un sistema de cambio rápido de cátodo.



Por lo tanto, el objetivo que se pretende conseguir es una mayor calidad del recubrimiento así como eliminar problemas de calor que existen actualmente. Se pretende lograr una reducción en el tiempo de mantenimiento y en el proceso de manipulación así como una mejora del aspecto externo consiguiendo una vista más moderna y sugestiva.

Todo estos cambios producirán como hemos dicho una menor pérdida de tiempo y por lo tanto una reducción de costes de mantenimiento y un mayor beneficio.

## **7.1. CAMBIO RÁPIDO DE CÁTODO**

En la actualidad existen una gran variedad de recubrimientos y obtención de diferentes tipos de capas. Podemos obtener capas simples de diferentes tipos de metales, o bien capas dopadas con diferentes metales e incluso la posibilidad de alternar capas simples con capas dopadas (multicapas).

Esta gran variedad de capas para recubrir herramientas, junto con el gran desarrollo comercial y la creciente aceptación de esta tecnología hace necesario la necesidad de un cambio constante de cátodos de diferentes metales.

La necesidad de un cambio de cátodos constante en los evaporadores actuales supone una pérdida de tiempo considerable y por lo tanto un coste económico bastante importante. Por lo tanto, el cambio rápido de cátodo es

una mejora muy importante y nos tienen que permitir conseguir una reducción importante del tiempo.

El cambio de cátodo supone un periodo de tiempo en el cual la instalación está inutilizada y no aporta ningún tipo de rendimiento. Actualmente la operación está compuesta de diferentes pasos no complicados, pero sí que tienen cierto riesgo de posibles complicaciones.

Los pasos a seguir son:

- Cerrar el paso de agua.
- Quitar las tuercas de sujeción de la parte interior con la tapa trasera de la carcasa.
- Sacar todo el conjunto interior y apoyarlo sobre unos ganchos realizados para este fin.
- Quitar las cerámicas y todo el conjunto de cebado del arco.
- Aflojar la tuerca que aprieta el sistema de sujeción del cátodo.
- Girar la falda del cátodo para poder extraerlo.
- Extraer el cátodo.
- Revisar la junta de hermeticidad.
- Colocar el nuevo cátodo.
- Apretar el sistema de sujeción del cátodo.
- Girar la falda hasta que contacte con el cátodo.
- Dar el agua y asegurarse de que no pierde agua.
- Volver a colocar los conjuntos de cebado del arco con sus cerámicas.



- Colocar todo el conjunto interior en su posición controlando que la junta de la tapa trasera quede en su posición correcta.
- Atornillar las tuercas de sujeción a la tapa trasera de la carcasa.

Todo esto supone un tiempo aproximado de unos 20 minutos de tener la instalación en espera y sin poder obtener producción. Además hay que tener en cuenta que durante este tiempo las paredes interiores de la cámara están en contacto directo con el aire y por lo tanto, condensan cierta humedad que provocará un retraso a la hora de conseguir un alto vacío para poder empezar el proceso de recubrimiento.

Existe aún un problema añadido que es la posibilidad de descuido por parte del operario de cerrar el paso del agua, con la consecuencia de que cuando se afloja el sistema de sujeción del cátodo, el agua se derrama mojándolo todo y dejando después restos de humedad que pueden retrasar igualmente la fase de vacío.

En resumen, las mejoras que se pretenden conseguir con el nuevo sistema de cambio rápido de cátodo son las siguientes:

- 1. Reducción del tiempo de cambio de cátodo de 20 minutos a unos 3 minutos aproximadamente.**
- 2. Menor coste económico por paro de la instalación.**
- 3. Menor condensación de humedad en las paredes de la cámara del reactor, con la ventaja de una mayor rapidez en el alcance de un alto vacío.**
- 4. Se evitan posibles descuidos del operario.**



Como se puede observar las ventajas del nuevo sistema de cambio rápido de cátodo son varias y muy importantes. Hay que tener en cuenta que la empresa Tractaments Térmics Carreras, S.A. puede llegar a tener en su poder y funcionando a pleno rendimiento un total de 15 evaporadores repartidos entre las 3 instalaciones que tiene a pleno rendimiento más una nueva instalación que está en construcción.

Obtenemos una ganancia de tiempo en el cambio de cátodo de entre 15 y 17 minutos, y como hemos visto no solo influye este tiempo, sino que también hay que tener en cuenta que cuanto menos tiempo este la cámara abierta y las paredes interiores de estas en contacto directo con el aire, se evitará la condensación de humedad, con lo cual la ganancia de tiempo se ve aún más favorecida al ser el tiempo de desgasificación menor.

Una ventaja más que existe con este nuevo sistema, aunque no sea de forma rotunda es la eliminación de la posibilidad de descuidos a la hora de cortar el agua, debido a que se ha pasado a una refrigeración indirecta, es decir el agua ya no está en contacto directo con el cátodo y por lo tanto no existe la posibilidad de derrame del agua a la hora de sacar este.

## **7.2. REFRIGERACIÓN DE CÁTODO INDIRECTA**

Como se ha nombrado anteriormente, gracias al nuevo diseño se ha pasado de una refrigeración directa o una refrigeración indirecta del cátodo. Esto quiere decir que en el nuevo evaporador el agua ya no refrigera directamente al cátodo debido a una camisa de cobre que se ha intercalado.





Las ventajas que trae consigo el hecho de intercalar una camisa de cobre son básicamente dos:

- 1. Permite no tener que cortar y dar el agua en el cambio de cátodo.**
- 2. El cátodo no tiene contacto directo con la junta de hermeticidad.**

El hecho de no tener la necesidad de cortar el agua cada vez que se tenga que realizar un cambio de cátodo supone como se ha descrito en el apartado anterior, eludir la posibilidad de descuidos por parte del operario y derrames de agua.

Igualmente, la necesidad de no tener que cortar el agua y evitar el posible descuido, evitará también justamente todo lo contrario, la posibilidad existente de no dar el agua y por lo tanto el aumento de temperatura del cátodo durante el proceso de recubrimiento.

Este posible descuido puede arrastrar consecuencias muy importantes, debido a la posible degradación de la junta de hermeticidad y su posterior destrucción como consecuencia de la alta temperatura alcanzada por el cátodo. Las consecuencias que trae consigo este punto son:

- Paro inmediato de la instalación debido a que durante el proceso de recubrimiento, se derrama el agua produciendo una pérdida total del vacío.



- Oxidación de las piezas que están en proceso de recubrimiento como consecuencia de la pérdida del vacío, la entrada de oxígeno dentro de la cámara y la temperatura de las piezas.
- Desmontaje del sistema planetario para el secado total del agua que pueda haberse introducido en el eje de este.
- Secado general de la cámara del reactor.
- Necesidad de realizar el mantenimiento de la bomba difusora de alto vacío, ya que el aceite vaporizado, debido a su enfriamiento repentino por exceso de aire y humedad se quema y pierde todas sus propiedades.
- Desmontaje y posterior montaje del cátodo para la sustitución de la junta de hermeticidad por una nueva.

Todo esto supone un paro de la instalación de entre 4 y 5 horas, lo que evidentemente produce un coste importante a la empresa. Al no estar el cátodo en contacto directo con la junta de hermeticidad, se evita en gran medida que pueda ocurrir este tipo de problemas.

### **7.3. CAMBIO RÁPIDO DE ELECTRODOS**

El diseño del nuevo evaporador incluye también una modificación del sistema de cebado del arco eléctrico. Se han substituido unas actuales antenas que sujetaban los electrodos y a través de los cuales saltaba la chispa que cebaba el arco eléctrico, por un sistema más moderno y de cambio de los electrodos mucho más rápido.



Existen dos antenas con un electrodo cada una, para la posibilidad de cebar el arco con uno o con el otro por si existe un fallo en alguno de los dos. Existe una diferencia de potencial entre el centro del cátodo y el extremo de la antena. El arco eléctrico salta a través del electrodo que no es más que una resistencia de cerámica.

El arco se mantiene en la parte frontal del cátodo y recorre toda su superficie evaporándolo de forma uniforme gracias a unas bobinas, por donde circula una corriente que crea un campo magnético uniforme alrededor del cátodo. Así mismo se evita que este se desplace hacia atrás recorriendo y evaporando partes del conjunto que no sean el cátodo del metal a implantar en el recubrimiento.

El sistema actual de cambio de electrodos supone el hecho de tener que desmontar la parte interior del evaporador al igual que cuando se requiere para el cambio de cátodo. Por lo tanto, cuando se realiza algún cambio de cátodo debido a que hay que desmontar las antenas con los electrodos, pueden revisarse y substituirse en caso de que estén dañados debido al propio arco.

Con el nuevo evaporador, ya no es necesario el desmontaje de estas antenas y de los electrodos. Se han realizado una serie de mejoras para la posible revisión y substitución de los electrodos. Primeramente se ha substituido las antenas fijas por unas espigas de quedan unidas junto con la tapa trasera del conjunto. Posteriormente se ha realizado un cuerpo del electrodo, compuesto de una caperuza y un vaso para el electrodo que nos permite acoplarlo a la espiga simplemente presionado hacia el interior. De esta manera la substitución o revisión se hace simplemente sacando el cuerpo del electrodo junto con este.



## **7.4. CONEXIONES RÁPIDAS DE AGUA**

Existe una necesidad de mantenimiento de las tuberías del circuito de refrigeración en óptimas condiciones para evitar posibles obstrucciones y por lo tanto una mala refrigeración del cátodo.

Una mejora de cara a posibles manipulaciones o desmontaje de todo el conjunto evaporador es la incorporación de nuevas conexiones rápidas de agua, a través de enchufes rápidos, substituyendo los actuales rácores que necesitaban de la ayuda de un destornillador para poder desconectar las mangueras debido a las bridas de sujeción que llevaban.

Con la aplicación de estos nuevos enchufes rápidos se consigue una mejor facilidad de manipulación.

## **7.5. MEJORA DEL ASPECTO EXTERIOR**

Con la construcción del nuevo evaporador para un reactor de recubrimientos se ha pretendido lograr un aspecto exterior mucho más moderno y elegante que los sistemas actuales, produciendo así una vista mucho más atractiva.

Para ellos se ha optado por fabricar todas las partes visibles del evaporador de acero inoxidable, teniendo especial cuidado con las soldaduras exteriores, mecanizándolas una vez realizadas para obtener un mejor aspecto exterior. Ciertas partes visibles son rectificadas para obtener un acabado superficial más brillante.