

PH
FISICA

Primeros ensayos con un equipo de plasma para la proyección de partículas fundidas a alta temperatura

Por LUIS ROSADO

Resumen

Se ha utilizado el soplete de plasma por arco para obtener altas temperaturas, de 10.000 a 15.000°K, y proyectar en su llama partículas fundidas de materiales refractarios —alúmina y circona— sobre piezas metálicas. Se dan algunos conceptos acerca de los plasmas físicos, de la magnetohidrodinámica, y detalles del montaje del equipo de plasma, de algunas aplicaciones en la industria y de los ensayos que se llevaron a cabo en el Instituto de Cerámica y Vidrio del Patronato «Juan de la Cierva».

INTRODUCCIÓN AL PLASMA

De acuerdo con Langmuir, el plasma físico es un gas altamente ionizado compuesto de un número igual de cargas libres, iones positivos y electrones. Si el gas se halla en equilibrio de ionización química, las tres clases de partículas poseen la misma energía cinética media y, por consiguiente, la misma temperatura absoluta T . La transición de gas a plasma tiene lugar, en el supuesto de que existe equilibrio termodinámico, según la reacción



El grado de ionización de las moléculas que dan origen al plasma obedece a la ecuación de Saha:

$$\frac{n_e \cdot n_i}{n_0} = C \cdot T^{3/2} \cdot e^{-\frac{U}{kT}}$$

donde:

n_e , densidad electrónica,

n_i , densidad iónica,

n_0 , densidad de las partículas neutras,

U , potencial de ionización del gas en eV,

C , constante que depende de la naturaleza del gas,

k , constante de Boltzmann,

T , temperatura absoluta.

El grado de ionización aumenta con la temperatura y es la unidad para $kT = U$.

Con frecuencia la ionización se produce por un campo eléctrico exterior, y el gas ionizado no se encuentra en equilibrio termodinámico. Esta es la razón por la cual se define, para cada clase de partícula, una temperatura cinética (véase Apéndice A) debida a la relación

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \int_0^{\infty} \frac{mv^2}{2} f(v) dv.$$

La función de distribución $f(v)$ no puede determinarse en la actualidad experimentalmente, en su lugar se dan los valores medio de la velocidad de cada tipo de partícula

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v dn_v = \int_0^{\infty} v f(v) dv, \text{ ya que } \frac{dn_v}{n} = f(v) dv,$$

siendo

m , masa de la partícula,

dn_v , número de partículas por unidad de volumen con velocidades comprendidas entre v y $v + dv$,

n , número total de partículas en la unidad de volumen.

$$\text{A menudo } T_0 \approx T_i \text{ y } \begin{cases} T_e \gg T_0 \\ T_e \gg T_i \end{cases}$$

donde

T_0 , temperatura absoluta de las partículas neutras,

T_e , temperatura absoluta de los electrones,

T_i , temperatura absoluta de los iones.

Resultando para una descarga gaseosa a baja presión

$$\begin{aligned} T_0 &\approx T_i \approx 300 \text{ }^\circ\text{K} \\ T_e &\approx 10.000 \text{ a } 50.000 \text{ }^\circ\text{K}. \end{aligned}$$

Luego, los plasmas pueden clasificarse, en orden a su temperatura cinética, de la forma siguiente:

a) Plasmas fríos: aquellos para los cuales T_i tiene un valor pequeño ($T_i < 1.000 \text{ }^\circ\text{K}$).

b) Plasmas calientes: aquellos para los cuales $T_i > 1.000 \text{ }^\circ\text{K}$.

Un plasma termonuclear debe tener una temperatura $T_i > 10^7 \text{ }^\circ\text{K}$. Este estado es el que existe en el interior de las estrellas fijas como el Sol, donde la temperatura es de millones de grados y los átomos de helio carecen de sus dos órbitas electrónicas.

LOS PLASMAS Y LA MAGNETOHIDRODINÁMICA

A) Plasmas

A escala microscópica, las partículas del plasma se comportan como las de cualquier gas, y a escala macroscópica, como un fluido. Por medio del campo electrostático de Coulomb las partículas cargadas interactúan unas con otras, dando lugar a fuerzas atractivas o repulsivas entre ellas (imagen microscópica). Por otro lado, la suma de muchos campos infinitesimales magnéticos y electrostáticos, que producen las partículas móviles, dan origen a un campo electrostático medio en que se mueve el plasma (imagen macroscópica).

Son muchos los procedimientos para mantener confinado el plasma —todos de tipo magnético— para evitar el contacto de las partículas con las paredes que lo desionizan y, consecuentemente, lo enfrían. A continuación citamos algunos.

a) *Estricción o efecto Pinch*

Es el más sencillo y encuentra aplicación en el soplete de plasma por arco. El efecto Pinch es doble: uno térmico, basado en la aspiración del gas frío que envuelve al plasma y produce su acción a lo largo del eje del arco; el otro es magnético y tiene su origen en las partículas de corriente —iones y electrones— que se mueven paralelas y son atraídas entre sí a causa del campo magnético de autoinducción según la fórmula

$$\vec{f} = \frac{d\vec{F}}{d\tau} = [\vec{j} \wedge \vec{B}] \text{ (ley descubierta por Ampere),}$$

la cual se deduce como sigue:

$$\begin{aligned} d\vec{F} &= I [\vec{dl} \wedge \vec{B}] \\ d\vec{F} &= \vec{j} \cdot S [\vec{dl} \wedge \vec{B}] \\ d\vec{F} &= S \cdot dl [\vec{j} \wedge \vec{B}] \\ d\vec{F} &= d\tau [\vec{j} \wedge \vec{B}] \end{aligned}$$

donde:

- \vec{f} , fuerza de Lorenz (dirigida siempre hacia el interior del plasma),
- I, intensidad de corriente,
- dl, longitud elemental del conductor,
- S, sección elemental del conductor,
- d τ , volumen elemental del conductor,
- \vec{j} , densidad de corriente,
- \vec{B} , inducción magnética.

Los dos efectos producen un aumento de la densidad de corriente y, por consiguiente, de la temperatura del plasma. Es decir, el gas ionizado se comporta como un buen conductor electrónico y, por efecto «joule», transforma la energía eléctrica en energía térmica.

La intensidad de corriente necesaria para equilibrar la presión

cinética del plasma, dirigida hacia fuera, viene dada por la relación de Bennet

$$I^2 = 2 N k T$$

siendo:

I, amperios,

N, número de partículas por centímetro de longitud de plasma,

k, constante de Boltzmann,

T, temperatura cinética del plasma (1 eV de temperatura cinéti-

$$\text{ca} = 1 \text{ kT} = 11.600 \text{ }^\circ\text{K} = \frac{2}{3} \text{ W.}$$

b) *Confinamiento por campos exteriores*

Esta clase de confinamiento se emplea en los procesos de fusión nuclear. Merecen mención los siguientes, por tratarse de los primeros donde se ha hecho investigación en el campo del plasma físico:

- 1) Dispositivo ZETA (Harwell, Inglaterra).
- 2) Stellerator (Universidad de Princeton).
- 3) Máquina espejo (Universidad de California).
- 4) Dispositivo D.C.X. (Laboratorio de Oak Ridge).

Los problemas que se presentan en estos tipos de confinamiento (equilibrio, estabilidad y radiación) están en vías de ser resueltos en la actualidad.

B) *Magnetohidrodinámica*

La magnetohidrodinámica estudia el movimiento de los fluidos conductores, especialmente el de los gases ionizados (plasmas) sometidos a un campo magnético **H**. Tiene gran importancia en el desarrollo de los reactores nucleares controlados, simulación de las condiciones de vuelos supersónicos, frenado de los vehículos espaciales a su reentrada en la atmósfera, aceleradores de partículas de alta energía, generadores de microondas, estudio de los fenómenos cósmicos y de la alta atmósfera, dispositivos termiónicos de conversión de energía y aplicación en recubrimientos cerámicos.

Para conseguir una elevada conductividad eléctrica en un plasma se requiere una gran densidad de electrones de alta energía. Esto puede ocurrir en un plasma en equilibrio térmico a tempera-

tura relativamente alta, a partir de unos pocos eV, o en un estado no equilibrado, en el que los iones y moléculas permanecen a baja temperatura y se suministra energía a los electrones por medio de una fuente externa, tal como un generador de microondas o de radiación ultravioleta.

Los fenómenos magnetohidrodinámicos resultan de una interacción de la electrodinámica con la hidrodinámica de las partículas. Para estudiarlos puede partirse de las leyes fundamentales de la electrodinámica dadas por Maxwell (ecuaciones que no sufren modificación), y las ecuaciones de la hidrodinámica, que sufren considerable variación al tener en cuenta la interacción del campo electromagnético con el fluido.

FACTORES A TENER EN CUENTA EN CUALQUIER TIPO DE RECUBRIMIENTO

A) *Fuente de energía*: potencia suministrada por el transformador-rectificador, electrodos del soplete, composición y gasto de gas.

B) *Material de proyección*: granulometría, cantidad y propiedades físicas y químicas del polvo empleado.

C) *Soprote a revestir*: naturaleza, preparación de la superficie por compuestos químicos o por arenado y temperatura en el instante de la proyección.

D) *Modo operatorio*: distancia apropiada soplete-pieza, ángulo formado por el chorro de plasma con la normal a la pieza, velocidad de barrido y atmósfera en que se realiza la proyección.

Son de mucho interés las propiedades físicas y químicas que adquiere la superficie del sustrato después del tratamiento con el chorro de plasma. Aunque se pueden alcanzar densidades de hasta 96 % del metal puro, siempre existe alguna porosidad, lo cual limita su empleo en la mejora de la resistencia a la corrosión. Sin embargo, en los recubrimientos cerámicos de metales (cermet), por tener los óxidos su punto de fusión más alto que el metal base, pueden proteger a éste contra la erosión y corrosión hasta temperaturas elevadas, así como actuar de aislante térmico y eléctrico. En general, los materiales cerámicos tienen un coeficiente de dilatación más pequeño que el del metal a recubrir, de modo que cuando se aplican como revestimiento de ellos quedan sometidos a compresiones. Este es el estado deseado en el caso de que las dilataciones de los dos materiales sean diferentes, ya que los produc-

tos cerámicos son resistentes a la compresión y débiles a la tracción.

Entre las aplicaciones de los recubrimientos cerámicos cabe destacar las siguientes:

a) *Aislamiento térmico*: recubrimiento con circonita (ZrO_2) de algunas piezas de aviones a reacción que suelen estar sometidas a elevadas temperaturas, de pistones y cámaras de combustión de los motores Diesel, de conos de vehículos espaciales, etc.

b) *Protección contra la corrosión y abrasión*: protección de metales sometidos a la acción continua de la atmósfera y de otros que trabajan en condiciones de inmersión en líquidos más o menos corrosivos.

c) *Protección eléctrica*: la alúmina (Al_2O_3) es un excelente aislante eléctrico, por lo cual se utiliza frecuentemente para aislar piezas metálicas diversas como hilos de termopares, bobinas de inducción, materiales plásticos, etc.

d) *Protección contra la oxidación de aceros*: recubrimientos poco porosos de los álabes de turbinas o turbinas completas que trabajan a la temperatura máxima de 1.200 °C.

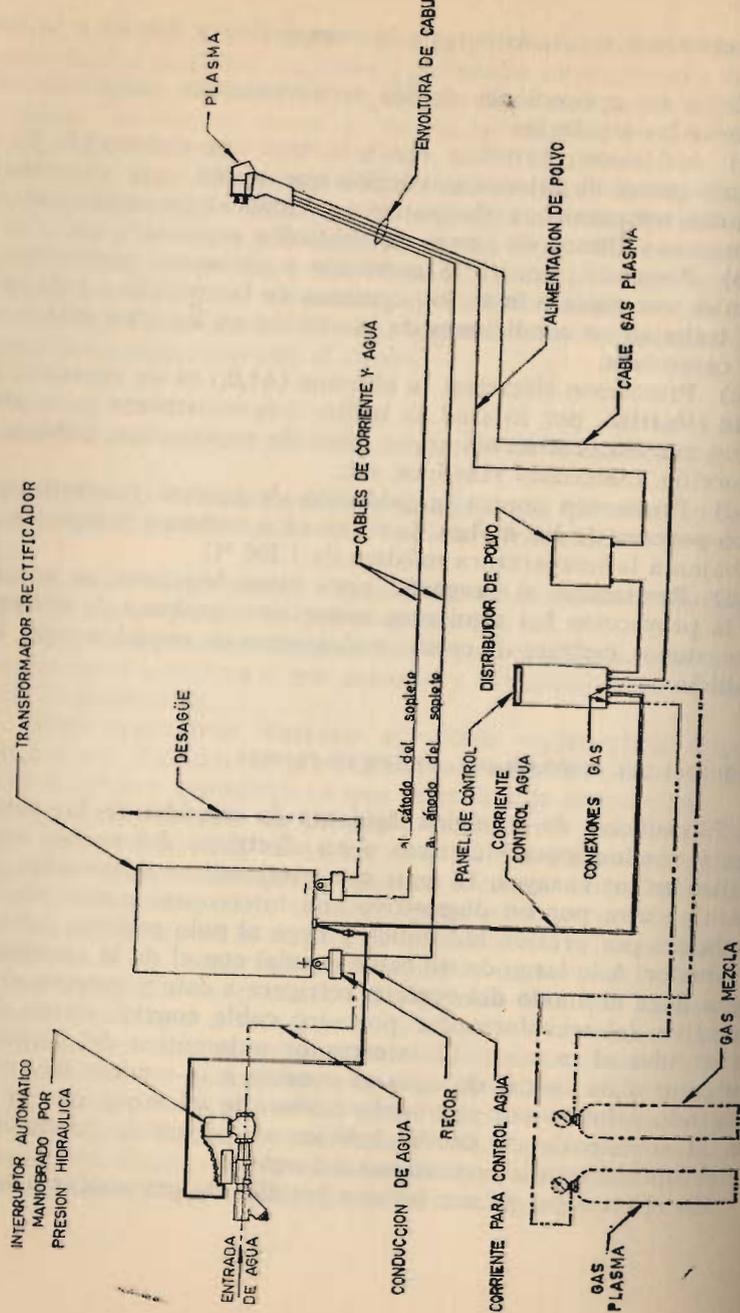
e) *Resistencia al desgaste*: para estas funciones se emplean en la proyección los siguientes materiales: carburo de wolframio (tungsteno), carburo de cromo y aleaciones de níquel, cromo, boro y silicio.

ESQUEMA DEL MONTAJE DEL EQUIPO DE PLASMA

El esquema de la página siguiente da una idea de las conexiones y conducciones eléctricas y no eléctricas del equipo que se utilizó en los ensayos. El agua que produce la refrigeración de la pistola entra por un dispositivo con interruptor automático maniobrado por presión hidráulica y llega al polo positivo del transformador. A lo largo de un cable coaxial con el de la corriente, el agua llega al ánodo del soplete, refrigera a éste y regresa al polo negativo del transformador por otro cable coaxial, desde donde se expulsa al exterior. El interruptor automático del dispositivo de control de caudal de agua se conecta a la consola de control, pasando primero por el transformador, de tal modo que la llegada al soplete de un caudal inferior al permitido produciría la interrupción total e instantánea del equipo.

En el esquema se ven las dos botellas de gas unidas a la con-

ESQUEMA DE MONTAJE DEL EQUIPO DE PLASMA



solamente de control, una para contener gas argón que produce el plasma y otra con gas, también argón, que actúa como portador del polvo de alúmina o de circonita. El gas plasma se introduce directamente en la pistola a la altura del extremo tronco-cónico y el gas portador se introduce en el soplete después de pasar por el distribuidor de polvo y arrastrar a éste hasta el ánodo de la pistola.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Es del tipo clásico (fabricado por la AVCO-Corporation de EE.UU.) y consta de pistola de proyección, transformador elevador, consola de control y refrigeración de agua por bombeo.

Pistola. Se usa el modelo PG-100. Los electrodos son, uno de tungsteno toriado (cátodo) de forma cilíndrico-cónica y el otro de cobre (ánodo) de forma de boquilla para permitir el paso del plasma a través de él. El gas se introduce tangencialmente en una cámara circular y luego pasa girando entre los electrodos. El polvo necesario para la proyección se introduce en el orificio de salida del cátodo con una ligera inclinación respecto al chorro de plasma y en sentido contrario al movimiento de éste. La refrigeración del ánodo y del cárter se lleva a cabo con agua. El agua procedente de la refrigeración sale de la pistola por un tubo coaxial con la corriente del cátodo. El hecho de que el agua de la refrigeración llegue a la pistola y salga de la misma por un tubo que envuelve al de conducción eléctrica es porque también refrigera a éste, ya que los cables de corriente se calientan al estar sometidos al paso de corriente de alta intensidad.

Transformador-elevador con rectificador de corriente de placas de selenio. Características del primario:
 Entrada posible (230 Vol., 136 Amp.), (380 Vol., 82 Amp.), (460 Vol., 66 Amp.).

Potencia (40,8 kW, 54,8 K.V.A.).

Frecuencia de la corriente 50 c/s.

Tres fases.

Características del secundario:

Salida posible (Paralelo: 44 Vol., 700 Amp.), (Serie: 88 Vol., 350 Amp.).

El transformador lleva un sistema de protección para asegurar su buen funcionamiento. Dispone de ventilador y un dispositivo de parada automática cuando la temperatura sobrepasa los 90°C. La

salida de los dos secundarios del transformador se puede hacer en serie o en paralelo, dependiendo del gas o gases, del material que se emplee en la proyección y del voltaje que se necesite a la salida (véase Tabla III en el Apéndice C). En los ensayos llevados a cabo (proyección de alúmina y circonita con gas argón) se usó:

Tensión de entrada 220 V (c.a.).

Frecuencia de la corriente 50 c/s.

Tensión de salida 44 V (c.c.).

Intensidad a la salida 700 A.

Consola de control. Esta responde a las funciones de reglaje, control y seguridad del equipo. Las conducciones de gas, agua y electricidad pasan por la consola de control, y sus electroválvulas de control están interconectadas de tal forma que un fallo en la maniobra del operario hace que sea imposible poner en marcha el soplete o que se detenga su funcionamiento. El panel de control contiene unas probetas graduadas para medir la presión del gas y el gasto de polvo. El distribuidor de polvo consiste en un recipiente cilíndrico con tornillo de Arquímedes a velocidades de giro variables que se encarga del transporte de polvo. Mediante un mecanismo apropiado lo recoge una corriente de gas que lo lleva directamente a la pistola, donde se inyecta por el ánodo en el plasma, en dirección casi normal al chorro, ligeramente en contracorriente y cerca del extremo avanzado del ánodo. Dicho dispositivo posee un mecanismo especial vibrátil que suministra una cantidad uniforme de polvo (2.000 gr/hora para circonita, cuya densidad es de 5,4).

Refrigeración del soplete por agua. El agua que se emplea en la refrigeración debe llegar a la pistola a una presión de 7 kg/cm². En el caso de no llegar con la presión requerida habría que bombearla, pues el equipo necesita un gasto mínimo de 1 m³/hora para su buena refrigeración.

ENSAYOS REALIZADOS

Los materiales refractarios tienen un punto de fusión elevado (véase Tabla II en Apéndice B) y por consiguiente son difíciles de proyectar en la llama de los sopletes «tradicionales». Por esto los recubrimientos con soplete de plasma han encontrado muchas aplicaciones en la industria cerámica y aeroespacial.

A continuación se dan algunos detalles de los primeros ensayos realizados con el equipo de plasma descrito anteriormente.

A) Preparación de la superficie del metal

La preparación de la superficie antes del recubrimiento es un factor que juega un papel importante en la obtención de una buena adherencia de la capa proyectada con el metal. El abrasivo utilizado para decapar la superficie metálica debe poseer la particularidad siguiente: picar la superficie, de tal forma que al observar ésta al microscopio presente concavidades cuyo volumen sea del mismo orden que el de las partículas de polvo proyectado.

El material abrasivo puede ser arena silícica de cantera, piedras de playa trituradas, granalla de acero templado o de fundición (utilizadas únicamente en EE.UU., Inglaterra y Holanda), granallas de carburo de silicio, etc. El mejor material es, sin duda, el carborundo (carburo de silíceo), empleado en la preparación de las superficies para estos ensayos.

El tamaño de grano del carborundo empleado osciló entre 1,8 y 0,5 mm y las presiones de aire utilizadas por la pistola de arena (pistola que funciona en circuito cerrado) en el granallado varió entre 3 y 5 kg/cm². Con estas condiciones, para arenar cada superficie de 36 cm² se invirtió un tiempo aproximado de 5 minutos.

La microfotografía de la figura 1 —obtenida al microscopio con objetivo 2,5 × ocular 8, luz reflejada rasante de 200 W de potencia, exposición 20" y película Kodak Plus X— muestra la superficie de una chapa de hierro sin ser sometida a granallado; la figura 2 es el aspecto que ofrece la misma superficie sometida al tratamiento de arenado (tiempo de exposición de la microfotografía 10").

B) Proyección de alúmina fundida

La alúmina (Al₂O₃) que es un excelente aislante eléctrico posee las siguientes propiedades físicas:

Peso molecular, 101,96.

Estructura cristalina, EXAGONAL.

Punto de fusión, 2.050°C.

Densidad, 3,987 gr/cc.

Resistividad, 2×10^{15} ohm/cm a 100°C.

Color, BLANCO.



FIG. 1. — Superficie metálica sin arenar.
(Luz rasante reflejada. $\times 55$.)



FIG. 2. — Superficie metálica arenada.
(Luz reflejada rasante. $\times 55$.)

Las condiciones que se tuvieron en cuenta en la proyección de alúmina con el modelo de pistola PG-100 fueron:

Anodo, N.º 901065.

Cátodo, N.º 901066.

Gas plasma, ARGON.

Gas portador, ARGON.

Corriente de arco, 700 Amp.

Tensión de arco, 44 Vol.

Gasto de polvo, 0,900 Kg/hora.

Tensión de entrada al transformador, 220 Vol.

Potencia utilizada, 40 kW.

Frecuencia de la corriente, 50 c/s.

Durante la proyección, el cambio de temperatura de la chapa recubierta osciló entre 20 y 300 grados centígrados; para no sobrepasar los 300° C fue necesario someter la superficie a una corriente de aire frío, y mantener el soplete en las sucesivas pasadas a una distancia comprendida entre 15 y 20 cm de la chapa.

La superficie de alúmina recubierta está compuesta de alúmina γ (sistema cúbico) y alúmina α (sistema exagonal) y el espesor de las capas depende principalmente de las veces que se haga pasar el chorro de plasma por un mismo lugar. El tanto por ciento de la porosidad es mucho más bajo con esta operación que cuando se emplea un soplete oxhídrico, ya que las partículas están bien fundidas como puede apreciarse en la microfotografía de la figura 3, realizada con luz reflejada rasante, objetivo 2,5 \times ocular 8 y tiempo de exposición 10".

La alúmina, que como hemos dicho es un excelente aislante eléctrico, se emplea con frecuencia para aislar piezas metálicas diversas: hilos de termopares, bobinas de inducción, baquelitas y materiales plásticos. Debido a que las chispas de ruptura carbonizan las baquelitas y los plásticos, éstos se vuelven conductores cuando se les expone por mucho tiempo a la electricidad. La forma apropiada para evitar el deterioro de tales materiales por la acción de la electricidad es someterlos a un revestimiento de alúmina.

C) Proyección de circonita fundida

El dióxido de circonio o circonita (ZrO_2) es un material refractario de escasa conductividad térmica, bajo coeficiente de dilatación y gran resistencia a la corrosión. Algunas de las propiedades físicas del polvo de circonita son:

Peso molecular, 123,22.
Estructura cristalina, CUBICO.
Densidad, 6,26 gr/cc.
Temperatura de fusión, 2.700°C.

Resistividad $\begin{cases} 1,0 \times 10^6 \text{ ohm/cm a } 385^\circ \text{ C.} \\ 2,2 \times 10^4 \text{ ohm/cm a } 700^\circ \text{ C.} \end{cases}$

Color, AMARILLO.



FIG. 3. — Aspecto de un recubrimiento de alúmina.
(Luz reflejada rasante. $\times 55$.)

Las condiciones que intervienen en la proyección de circonita son:

Anodo, N.º 901065.

Cátodo, N.º 901066.

Gas plasma, ARGON.

Gas portador, ARGON.

Corriente de arco, 650 Amp.

Tensión de arco, 28 Vol.

Gasto de polvo, 1,73 Kg/hora.

En una pasada rápida del chorro de plasma por la superficie se consiguió la preparación para obtener la microfotografía de la figura 4 (luz reflejada rasante de 200 W, objetivo 2,5 \times ocular 8, tiempo de exposición 4"). La figura 5 (Objetivo 10/0,25 \times ocular 8, exposición 4") es el detalle del círculo marcado en la figura anterior.



FIG. 4. — Aspecto de un recubrimiento de circonita.
(Luz reflejada rasante. $\times 55$.)



FIG. 5. — Detalle de un sector del recubrimiento de la figura 4. (Luz reflejada rasante. $\times 200$.)

Aunque las microfotografías anteriores muestran una considerable porosidad y pequeñas esferas sin llegar a deformarse (las esferas de las figuras 4 y 5 tienen un diámetro medio de 9 micras), lo cierto es que en un caso práctico la porosidad se reduce considerablemente. Por lo cual este método de proyección se puede emplear en los recubrimientos de cámaras de reacción de los turborreactores para evitar la corrosión que se originaría a las altas temperaturas a que trabaja normalmente, de naves espaciales y conos de cohetes que han de sufrir una reentrada en la atmósfera, de la cámara de combustión y pistón de los motores Diesel, etc.

D) Esferoidización de alúmina y de circonita

La esferoidización de partículas se obtiene haciendo llegar el polvo a la llama de plasma. El polvo funde en la llama y cae libremente por gravedad. Durante la caída el material fundido se enfría y, por consiguiente, se forman pequeñas bolas o esferas de diversos diámetros.

Con las diminutas bolas obtenidas en la proyección pueden conseguirse, en un recipiente que vibre, densidades de empaquetamiento del 90 %, lo cual es imposible conseguir por prensado mecánico de partículas no esféricas. Por golpeo mecánico se llega a una densidad mayor. Precisamente, éste es el procedimiento que se usa en la preparación de los combustibles nucleares (óxido de uranio incrustado en un metal); el elemento combustible de los reactores nucleares que se logra por tal método aumenta mucho la conductividad térmica y disminuye en gran parte la salida de los gases radiactivos que se liberan en la fisión nuclear, con lo cual el rendimiento del reactor aumenta considerablemente.

Cuando proyectamos alúmina con el soplete de plasma se obtuvieron pequeñas esferas de Al_2O_3 , sin más que retirar la chapa donde hacíamos los ensayos de revestimiento. La figura 6 (objetivo 10/0,25 \times ocular 8, luz reflejada rasante de 200 W de potencia y tiempo de exposición 25") muestra una mezcla de las microscópicas esferas logradas y unos cristales de alúmina que se añadieron para ver el contraste entre las dos clases de partículas. El diámetro medio de las pequeñas bolas es de 7 micras.

Siguiendo el procedimiento anterior obtuvimos partículas de circonita de 10 micras de diámetro (fig. 7, objetivo 2,5 \times ocular 8, exposición 25"). La figura 8 (Objetivo 10/0,25 \times 8) es una ampliación de la zona circular de la figura 7.

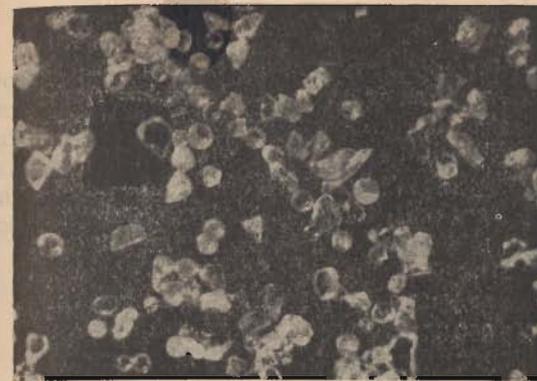


FIG. 6. — Mezcla de cristales de Al_2O_3 sin proyectar y esferas de Al_2O_3 proyectadas. (Luz reflejada rasante. $\times 200$.)

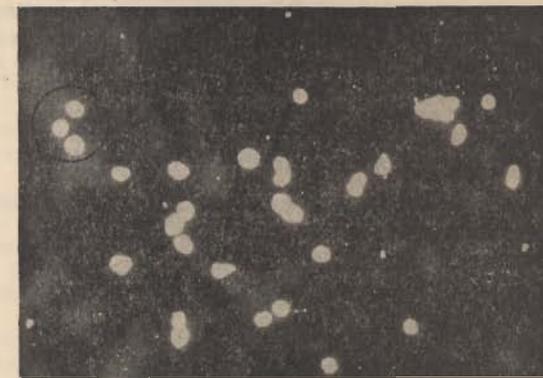


FIG. 7. — Partículas de ZrO_2 obtenidas en la proyección. (Luz reflejada rasante. $\times 55$.)

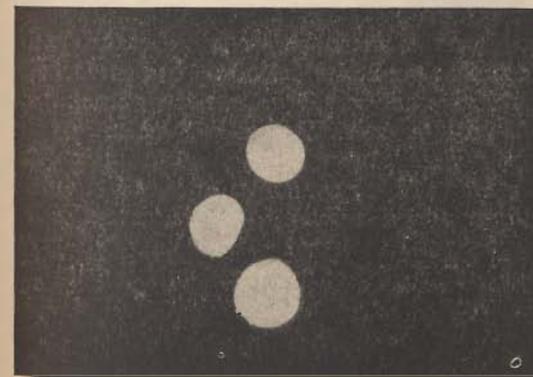


FIG. 8. — Detalle de un sector de la microfotografía de la figura 7. (Luz reflejada rasante. $\times 200$.)

Los recubrimientos cerámicos de los metales protegen a éstos contra la acción corrosiva de los gases a alta temperatura, los aísla del calor y de la electricidad, y los defienden del desgaste por abrasión. Un recubrimiento con alúmina protege a la pieza térmica y eléctricamente. Cuando se utiliza circona en la proyección, la capa protectora ofrece buena resistencia a la abrasión por fricción y a la acción corrosiva de los gases a alta temperatura.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi reconocimiento al doctor don Demetrio Alvarez-Estrada, Vicedirector del Instituto de Cerámica y Vidrio del Patronato «Juan de la Cierva» de Madrid, por su inestimable apoyo.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, A. C. «Plasma-jet: a new tool for ceramics». *Cera. Ind.*, 82 (4). Abril de 1964.
- ALVAREZ-ESTRADA, D. «Proyección de partículas fundidas a alta temperatura». *Bol. Soc. Espa. Cerá.*, Vol. 3, No. 3 (1964).
- ANÓNIMO. «Plasma fourth state of matter». *Ind. and Eng. Chem.*, 55 (1), pp. 16-23 (1963).
- BROSSARD, J. y otros. «Comparaison de quelques résultats expérimentaux obtenus sur différents types de générateurs de plasma.» *Rev. Htes. Temp. et Refract.* Tomo I. No. 2 (1964).
- CABANNES, F. y otros. «Étude de jets laminaires de plasma d'argón.» *Rev. Htes. Temp. et Refract.* Tomo I. No. 2 (1964).
- DELCROIX, J. L. *Physique des Plasmas*, I. Dunod, París (1963).
- DENNERY, F. «Caractéristiques des colonnes d'arc». *Rev. Htes. Temp. et Refract.* Tomo I. No. 4 (1964).
- DUBUS, M. y MOSEAN, M. «Física del plasma». Conferencias que pronunciaron los autores en el curso de «Electrónica Cuántica, Física del Sólido y del Plasma», organizado por el Patronato «Juan de la Cierva», del C.S.I.C., abril-junio de 1965.
- GIBEAUT, W. A. y OGDEN, H. R. *Summary of seventh meeting of the refractory composites working group*. D.M.I.C. Report 184, mayo de 1963.
- GLANSDORFF, P. «Définition de la température, en particulier dans le cas des plasmas.» Faculté Polytechnique de Mons. Journées des très hautes températures. Diciembre de 1961.
- KING, L. A. «Theory of plasmas in high intensity arcs.» Faculté Polytechnique de Mons. Journées des très hautes températures, diciembre de 1961.
- LJNGUET, R. «Revêtement céramiques projetés au chalumeau a plasma.» 3.^{er} Colloque National del C.N.R.S., París (1962).
- LJNGUET, R. y otros. «Revêtement céramiques par projection á haute temperature.» *Bull. Soc. Franc. Ceram.* No. 54 (1962).
- LINHART, J. G. y MAISONNIER, Ch. «Proprietés générales des plasmas.» Faculté Polytechnique de Mons. Journées des hautes températures, diciembre de 1961.
- MEYER, H. «Fundamentos y aplicaciones del soplete de plasma.» *Bol. Soc. Espa. Cerá.* Vol. 4. No. 6 (1965).
- ORBACH, K. «How ceramics uses plasma jet.» *Cer. Ind.*, 9 (5) (1962).
- ORLOWSKI, P. *Protección por pistola de gases*. José Montesó (Editor), Barcelona (1963).
- SY, A. «Recherches sur les plasmas produits dans les arcs soufflés.» *Rev. Htes. Temp. et Refract.* Tomo II (1965).
- SY, A. y CABANNES, F. «Caracteristiques physiques d'un chalumeau à plasma.» 3.^{er} Colloque National del C.N.R.S., París (1972).
- SY, A. y CABANNES, F. «Composition et fonctions thermodynamiques d'un mélange d'argon et d'hydrógene.» *Rev. Htes. Temp. et Refract.* Tomo I. No. 4 (1964).

URBAN, C. «La projection au chalumeau à Plasma». *Bull. Soc. Franc. Ceram.* No. 66, pp. 5-21 (1965).

VYNCK, I. de. «Comparaison des propriétés fondamentales des generateurs de plasma à courant continue». *Silicates Ind.*, p. 65, febrero de 1966.

APÉNDICE A

Temperatura cinética de un gas

Según la teoría cinética de los gases perfectos, la presión que ejercen las partículas que entran en la unidad de volumen, cuyas velocidades están comprendidas entre v y $v + dv$, es

$$p = \frac{1}{3} m \int_0^{\infty} v^2 dn_v.$$

Llamando velocidad cuadrática media a $\bar{v}^2 = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v^2 dn_v$ y ad-

mitiendo una distribución continua de velocidades en el caos molecular, la presión del gas aparece entonces relacionada con las propiedades individuales de la partícula; en efecto, la expresión

resultante $p = \frac{1}{3} m n \bar{v}^2$ relaciona una propiedad macroscópica (la

presión) con las propiedades de las partículas del gas.

Una consecuencia de esta teoría es la interpretación de la temperatura.

Sea N el número total de partículas contenidas en un volumen

V , entonces $n = \frac{N}{V}$, que llevado a la ecuación anterior da $p = \frac{1}{3} m$

$$\frac{N}{V} \bar{v}^2 \text{ o bien } pV = \frac{1}{3} m N \bar{v}^2 \quad (1).$$

De otra parte, la ecuación de los gases perfectos puede ponerse

$$pV = n_o RT, \text{ pero } n_o = \frac{N}{N_A} \text{ y } k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{julios}}{\text{grados}} \quad (R = 8,31 \cdot 10^3)$$

julios
 $\frac{\text{mol} \cdot \text{grado}}{\text{mol} \cdot \text{grado}}; N_A = 6,03 \cdot 10^{26}$ moléculas en un mol), luego $pV = kNT$
 (2).

Comparando las ecuaciones (1) y (2) y simplificando resulta

$$\overline{mv^2} = 3kT \text{ ó } \frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{3}{2} kT, \text{ que nos indica que la energía ciné-}$$

tica media de traslación es proporcional a la temperatura absoluta del gas.

APÉNDICE B

TABLA I

	<i>Temperaturas estabilizadas</i>
Gas del alumbrado-aire	1.800 °C
Gas del alumbrado-oxígeno	2.700 »
Butano-aire	1.900 »
Butano-oxígeno	2.900 »
Hidrógeno-oxígeno	2.600 »
Acetileno-oxígeno	3.100 »
Reacción nuclear controlada	3.000 »
Horno solar	3.700 »
Plasma por arco hasta	50.000 »

	<i>Temperaturas instantáneas</i>
Descarga brusca de un alto voltaje (duración 1 seg.)	20.000 °C
Bomba nuclear por fisión	1.000.000 »
Bomba nuclear por fusión	100.000.000 »
Dispositivos para los procesos de fusión nuclear .	varios millones de °C

TABLA II

Material	Temperaturas de fusión
Mg O	2.800 °C
W C	2.830 »
U O ₂	2.880 »
Ti B ₂	2.900 »
Ti N	2.950 »
Zr B ₂	2.990 »
B N	3.000 »
Ti C	3.200 »
Th O ₂	3.300 »
Ta N	3.340 »
W	3.440 »
Zr C	3.530 »
Ta C	3.800 »
Hf C	3.890 »

APÉNDICE C

TABLA III

Gases	Voltaje a la salida del transformador	Clase de conexión
Argón	25 a 40	Paralelo
Helio	40 a 65	Paralelo
Nitrógeno	65 a 80	Serie
Argón-Hidrógeno	30 a 45	Paralelo
Helio-Argón	35 a 50	Paralelo
Nitrógeno-Hidrógeno	70 a 100	Serie