

Construcción de un horno de alto vacío para metalización de herramientas para mecanizado, de acero rápido e inserto de metal duro.

Daniel Ziegler, Nelson Mazini, Mauro Puccinelli, Cesar Lanz, Gustavo Albizua

*Departamento de Ingeniería
Universidad Nacional de Sur
Av. Alem 1253 – Bahía Blanca - Buenos Aires – Argentina
Tel: +54-2914595179 - E-mail: dziegler@uns.edu.ar*

RESUMEN

La duración del filo en herramientas de corte para mecanizado se ve incrementada de manera sustancial cuando las mismas se encuentran recubiertas con una capa de óxidos, nitruros o carburos de metales como el Ti, Al, W y Cr, o sus combinaciones. La técnica utilizada para la deposición de los recubrimientos es la de plasma en horno de alto vacío.

En el presente trabajo se describen los materiales, criterios de dimensionado y planos para la construcción de dicho horno. A grandes rasgos el mismo consta de: una cámara donde se produce el alto vacío, en la cual se encuentran alojados los materiales a tratar y metales usados en la deposición.

El vacío es generado con una bomba de alto vacío por un sistema llamado de difusión que asegura un valor próximo a 10^{-10} Torr a 25°C.

La cámara cuenta además con un sistema de resistencias eléctricas con baffles de radiación que permite calentar las piezas a tratar después de la deposición de metales para lograr la difusión de los mismos.

Para el proceso es necesario incorporar los gases Nitrógeno y Argón a la cámara lo cual se lleva a cabo mediante dos válvulas reguladoras de presión y caudal.

En cuanto a la instrumentación del equipo se cuenta con 10 termocuplas tipo K para el sensado de la temperatura de la cámara en lugares estratégicos y dos fuentes de energía eléctrica, una de alta tensión y otra de alta corriente, encargadas de ionizar las piezas y sublimar el metal a depositar.

También se describe el procedimiento operativo del horno y el control de las distintas variables que afectaran las características de las capas depositadas en cuanto a sus espesores, durezas y otras variables tanto mecánicas, como microestructurales, con el objeto de evaluar su comportamiento al desgaste y duración de filo en operaciones de mecanizado.

Palabras Claves: Horno de vacío, Recubrimientos, Insertos, Sputtering, Metalización.

1. INTRODUCCIÓN

En el laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica se viene desarrollando desde hace años, el estudio del desgaste y tiempo de duración de filo de herramientas de corte.

Dado que la nueva generación de herramientas e insertos se fabrican recubiertos de capas de óxidos y nitruros a fin de prolongar su vida útil, se decidió fabricar un horno para realizar la deposición de dichos recubrimientos sobre distintas piezas.

Con ese fin se desarrollo un horno de vacío de laboratorio para realizar recubrimientos y tratamientos térmicos a los insertos a alto vacío.

De acuerdo a la literatura consultada y según las premisas de lo que se desea realizar, se seleccionaron los materiales que se consiguen en el mercado local para llevar a cabo la construcción de la manera más económica y fiable.

Las herramientas de acero rápido y los insertos sinterizados que se encuentran con una coloración dorada, generalmente están recubiertas de nitruro de titanio. A su vez los sinterizados, tiene también incorporado en su capa superficial aluminio en forma de óxido.

De acuerdo a la literatura consultada [1-3], sobre la base de las herramientas o insertos se debe realizar una deposición de aluminio y titanio. Para ello es necesario contar con una superficie limpia sin ningún tipo de contaminación [4] por lo que se realiza una limpieza de la superficie con desprendimiento de material de la misma conocida como "sputtering". Esta técnica requiere evacuar el aire atmosférico de la cámara y colocar un gas como el argón a baja presión y luego aplicar un potencial eléctrico elevado sobre la pieza. Una vez que se obtiene una superficie limpia se pasa a la etapa de deposición de los metales para lo cual se dispone de dos filamentos de tungsteno con el material a evaporar (aluminio, titanio) arrollado sobre estos.

Para evitar metalizar las paredes de la cámara, se aplica un potencial eléctrico elevado entre el filamento y las piezas con el fin de dirigir las partículas vaporizadas hacia estas últimas. Se cuenta con un disruptor externo para no quemar la fuente de tensión.

Una vez depositado el metal que se desea sobre la pieza es necesario oxidar o nitrurar dichos metales para obtener las elevadas durezas buscadas; para esto se introducen gases a baja presión y se aplica un potencial eléctrico inferior al utilizado para el metalizado.

Por otro lado si se quiere realizar el tratamiento con mayor celeridad, se pone en funcionamiento el horno de resistencias que calientan la pieza por radiación.

Es recomendable que el control de las resistencias del horno este aislado de la red por un transformador 220v-220v, con un aislamiento mínimo de 2Kv.

La Figura 1 muestra una vista general de la instalación terminada. Se distingue a la izquierda, la cámara con todas sus conexiones, mientras que a la derecha se visualiza la bomba de alto vacío.



Figura 1 Instalación completa de cámara y bomba de alto vacío.

2. DESCRIPCIÓN CONSTRUCTIVA, CÁLCULOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Este trabajo se centra en la descripción de los cálculos, procedimientos y planos para el dimensionado y construcción de la cámara de vacío en sí misma. Dado a lo extensivo de las descripciones y cálculos de todas sus partes y a la limitación del tamaño de este trabajo, se hará una breve descripción de las mismas y del resto de los elementos que componen la instalación, por lo cual las marchas de cálculo serán resumida y se darán valores directamente. Para cualquier consulta debe remitirse a las referencias citadas.

2.1. Desarrollo de la cámara

Dado que la cámara se calcula del interior al exterior de la misma, según la muestra, la temperatura y medios de calefacción a utilizar, se realizaron las siguientes hipótesis:

Para muestras de hasta 60 mm de diámetro por 100mm de altura que se van a calentar por medio de resistencias hasta 1000°C. Con esto se obtiene el volumen con el cual se comienza el cálculo de la cámara radialmente hacia afuera.

El calentamiento se realiza en un horno refractario cilíndrico de 70 mm de diámetro interno, 15 mm de pared y 140 mm de altura, con resistencias calefactores de aleación Kanthal [5,6].

En vacío, el total de la transmisión de calor se lleva a cabo por radiación, motivo por el cual se debe disponer de baffles de radiación para evitar calentar las paredes de la cámara [7].

A su vez, se adopta el diámetro exterior de la cámara, que puede ser modificado de acuerdo al tamaño de las piezas que se desee colocar dentro de ella, teniendo en cuenta que a mayor volumen mayor es el tiempo necesario para realizar el vacío en la misma.

En nuestro caso adoptamos una cámara cuyo diámetro exterior es 3 veces el diámetro externo del horno calefactor y como debido a la presencia de los terminales de alimentación que cuentan con sus respectivas aislaciones, se le agregan 35 mm en el radio.

El material utilizado en la construcción de los baffles es acero inoxidable que se adquiere en el mercado local con una terminación superficial de pulido a espejo, esta elección es debido al valor de emisividad de este material con esta terminación.

Para el cálculo de los baffles de radiación, se adopto por 3 superficies concéntricas tal como lo muestra la Figura 2, donde se ve el horno eléctrico y un esquema del mismo.

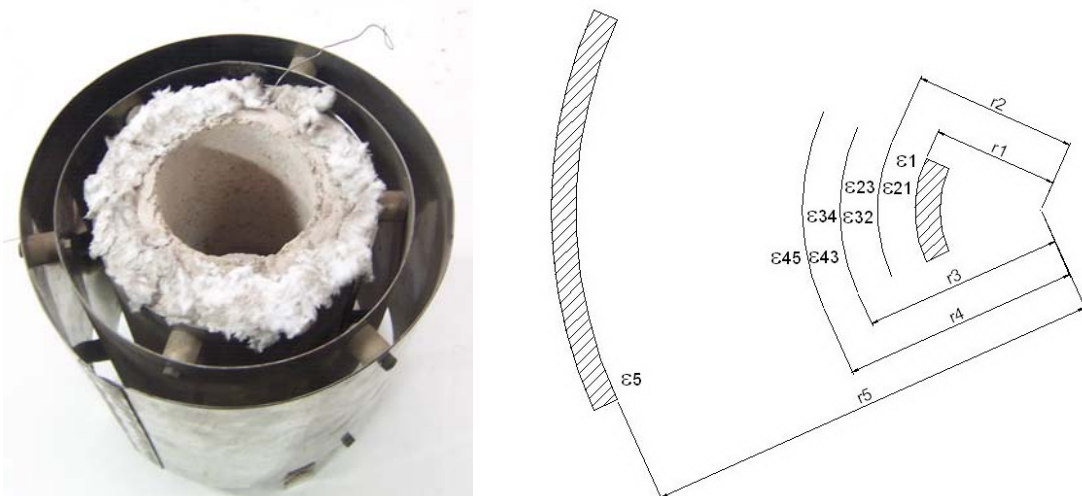


Figura 2 Imagen del horno y esquema de cálculo

En vacío la transmisión de calor por radiación es:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left[\frac{A \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^4 + B \left(\frac{r_1}{r_2} \right)}{A + B \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{donde } A = \frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{12}} - 1 \right) \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \text{ y } B = \frac{1}{\varepsilon_{23}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{32}} - 1 \right) \left(\frac{r_2}{r_3} \right) \quad (1)$$

Donde r_i son los radios de cada baffle, ε_i las emisividades de cada superficie de los baffles, del calefactor y la pared interna del recipiente y T_i las temperaturas absolutas para cada superficie.

El primer radio corresponde a la pared de refractario del calefactor, los tres radios siguientes a los baffles de radiación y el radio mayor a la pared de la cámara.

Se adoptó a $T_1=1000$ °C (pared de refractario del calefactor) y $T_5 =25$ °C (pared del horno) y los siguientes radios y emisividades:

$$r_1 = 50mm \quad r_2 = 65mm \quad r_3 = 80mm \quad r_4 = 95mm \quad r_5 = 185mm$$

$$\varepsilon_1 = 0.95 \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \varepsilon_{34} = \varepsilon_{43} = \varepsilon_{45} = 0.05 \quad \varepsilon_5 = 0.25$$

Con los todos los valores adoptados y la Ecuación (1) se obtienen los valores de las temperaturas para distintos radios pertenecientes a puntos dentro de la cámara, tal como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1 Temperaturas en distintos puntos de la cámara.

Radios (mm)	50	65	80	95	185
Temperaturas (°C)	1000	946	822	648	25

Estos valores se vuelcan en la Figura 3.

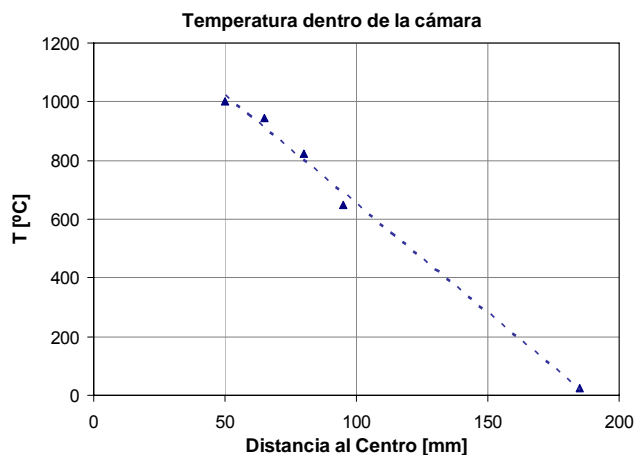


Figura 3 Temperaturas calculadas dentro de la cámara.

De esta grafica anterior se desprende la conclusión de que cualquier terminal que se coloque dentro de la cámara estará expuesto a elevadas temperaturas por lo cual además de ser refrigerado, debe poseer buena conductividad térmica y eléctrica a esas temperaturas.

Los materiales utilizados como aislantes sobre los terminales en la zona exterior de la cámara pueden ser: grilón, teflón, etc., pero dentro de esta, solamente se pueden incorporar materiales cerámicos.

2.2. Terminales

De acuerdo al punto anterior, con el fin de alimentar las resistencias eléctricas y la fuente de alta tensión para las piezas, se confeccionaron tres tipos de terminales. Dos de ellos son para conducir la alta corriente (dos tipos) que vaporiza los metales a depositar y el otro lleva la alta tensión a las piezas a metalizar.

Se buscó estandarizar las entradas al horno, por lo que se logró hacer que los terminales fueran intercambiables.

En la Figura 4, a la izquierda se aprecian los distintos tipos de terminales. En el centro se observa el sistema de terminales inferiores ensamblado y a la derecha de la figura se ven instalados en el inferior de la cámara de vacío.



Figura 4 Tipos de terminales e instalación en inferior de cámara de vacío.

En los tres tipos de electrodos se utilizaron materiales de uso corriente tal como cobre, latón, grilón y acero inoxidable. Los terminales de cobre son huecos y tienen un tubo central también de cobre; dicha configuración provee refrigeración por aire comprimido a la punta de los terminales que se alojan en el interior del horno.

2.3. Mirillas

Para observar el proceso en el interior de la cámara, se dispuso de dos mirillas de doble vidrio y de espesor suficiente para soportar el alto vacío de la cámara. El doble vidrio evita un salto térmico elevado entre interior y exterior que pueda producir la rotura de los mismos. El sellado del conjunto vidrio-aro metálico se realiza mediante O'Rings de Buna, impregnados con grasa de alto vacío Dow Corning. La Figura 5 muestra la mirilla superior ensamblada.



Figura 5 Conjunto doble vidrio-aro formando la mirilla superior.

2.4. Filamento evaporador de metales

Sobre los terminales montados sobre la tapa inferior se coloca un soporte de cobre que toma por sus extremos a una varilla de Tungsteno de uso corriente en soldadura TIG.

Sobre la varilla se arrolla el alambre del metal a volatilizar que se alimenta por medio de una fuente de baja tensión y alta corriente.

En nuestro caso se dispone de un transformador 220V a 1V de 2,2 kW que se regula con un VARIAC.

Se colocaron 3 terminales para poder volatilizar dos metales simultáneamente.

2.5. Calculo del espesor de la pared de la cámara de vacío

Para el cálculo del recipiente sometido a presión generada por el vacío, se recurrió al cálculo por ASME Sección 8. Para su implementación se utilizó el diagrama denominado "Gráfica para determinar el espesor de pared para recipientes sujetos a vacío total" [8].

De acuerdo al diámetro y la temperatura de trabajo del equipo, se obtiene el valor de Do/t .

En nuestro caso se adopta $T=300$ °F como máximo, temperatura limitante para evitar la degradación de las juntas O'Rings de Buna, aunque difícilmente se llegue a esta temperatura en la zona donde se encuentran dichas juntas.

Entrando con $L=20$ " que es la distancia entre brida superior e inferior de la cámara y la curva de $D=18$ " se obtiene el valor de L/D .

Con esa relación se entra en la curva superior a la temperatura seleccionada y se obtiene el valor de $Do/t=275$. Con este valor se va a la curva de espesor requerido que es de 2,54 mm.

Dado que sobre la envuelta se van a soldar conexiones y mirillas sin poncho se debe utilizar un espesor mayor.

De acuerdo al cálculo por presión externa para las conexiones, dado que se necesita la mitad del valor de espesor que si fuera por presión interna, se obtiene que el valor del espesor del refuerzo sea de 0.25mm

En nuestro caso se opto por una chapa comercial AISI 316 de 3/16" de espesor (4,7mm).

El motivo por el cual se utiliza acero inoxidable en la construcción de la cámara es que si hubiera oxidación, esta absorbe humedad y esto prolonga el tiempo necesario para llegar a los valores de vacío requeridos; podemos decir que "cuanto menos humedad haya en la cámara y los materiales que la componen, antes se logra el vacío deseado".

2.6. Calculo de la conexión a la bomba difusora

Cuando se trabaja con vacío la línea que se conecta desde la cámara hasta la bomba difusora, tiene una determinada conductancia [9]. Si la velocidad de la bomba S_0 (2.36 Lts. /seg.) y en el extremo es S (cámara):

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_0} + C \quad \text{y} \quad C = 1.59 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{273M}{T}} \left(\frac{l}{d^3} + \frac{2}{3d_1^2} + \frac{2}{3d_2^2} + \frac{4}{3d_3^2} \right) \left[\frac{\text{seg}}{\text{cm}^3} \right] \quad (2)$$

Donde: C es la resistencia de la línea de vacío al flujo del gas.

Se adopta $M=29$ para el aire, $T = 300$ °K y l (longitud media recta de la línea)= 44 cm

d es el diámetro del tubo (10cm) , los siguientes términos son las resistencias de los extremos del tubo y el último término un codo a 90°. En nuestro caso como no hay cambio de sección en la entrada (d_1) y la salida (d_2), y el codo (d_3) es de mayores dimensiones, no los consideramos.

Tomando las dimensiones en cm queda: $S = 2.359$ Lts. /seg. Con lo cuál la pérdida es mínima.

2.7. Calculo del espesor de las tapas

Se aproxima el valor de acuerdo a la siguiente ecuación [10]

$$t = d \sqrt{(C'.P / S.E) + 1,9.W.hg / S.E.d^3} \quad (3)$$

Donde t es el espesor de la brida, C' es un coeficiente que depende del tipo de tapa, S es la tensión admisible del material a la temperatura de trabajo, d es el diámetro, E es la eficiencia de la junta y hg es la distancia al alojamiento del sello. Si bien esta ecuación se utiliza para bridas ciegas atornilladas, en el centro de ambas tapas se colocaron tramos de tubos para el montaje de la mirilla en el caso de la tapa superior y de los terminales en la tapa inferior; con lo que se aumenta la rigidez de las tapas por lo que el valor calculado tiene una componente de seguridad implícita.

Para este caso, los valores de la ecuación son:

$C'_{Min} = 0.20$ (tapas circulares) $P = 30$ psi $S = 16600$ psi $E = 1$ $d = 14.14''$ $hg = 0.75''$

En primer instancia se debe tomar el valor de W como el mayor entre W_{m1} (cálculo de trabajo) y W_{m2} (de la junta).

$$W_{m1} = 0,785.G^2.P + 2.b.\pi.G.m.P \quad W_{m2} = \pi.b.G.y \quad (4)$$

$G =$ diámetro ubicación empaque $= 14.14''$

$P =$ presión de diseño $= 30$ psi

$m =$ relación $t_r/t_s = 1$ (adimensional) $t_s =$ espesor tapa calculado $t_r = t_s +$ sobreespesor por corrosión

$y =$ carga máx. admisible en el empaque $= 200$ lb/pulg². (depende del material de junta)

$b =$ ancho efectivo de contacto del empaque $= 0.20''$

Con estos valores se obtienen:

$$W_{m1} = 5241.6 \text{ lb/pulg.} \quad W_{m2} = 1776 \text{ lb/pulg.}$$

Ahora para calcular otro valor de W , para el sello se toma $P = 0$ y S a temperatura ambiente

$$W = \frac{(A_m + A_b)}{2} S_a \quad (5)$$

Siendo

$A_m =$ el mayor valor entre A_{m1} y A_{m2}

$A_{m1} = W_{m1}/S_b$ y $A_{m2} = W_{m2}/S_a$

$S_a =$ esfuerzo máximo permisible del material de los tornillos, a la temp. ambiente en lb/pulg.²

$S_b =$ esfuerzo máximo permisible del material de los tornillos, a la temp. de diseño en lb/pulg.²

$A_b =$ Área transversal neta de los tornillos en pulg.²

Las bridas ambas tapas llevan 24 tornillos cada una, de $d = 1/2''$ de material SAE Grado 1 [11] con resistencia a la tracción de 33 ksi y considerando que a 300 °F no hay disminución de su resistencia, se tiene:

La Figura 7 muestra un corte longitudinal de la cámara con todas sus partes ensambladas por soldadura y bulones.

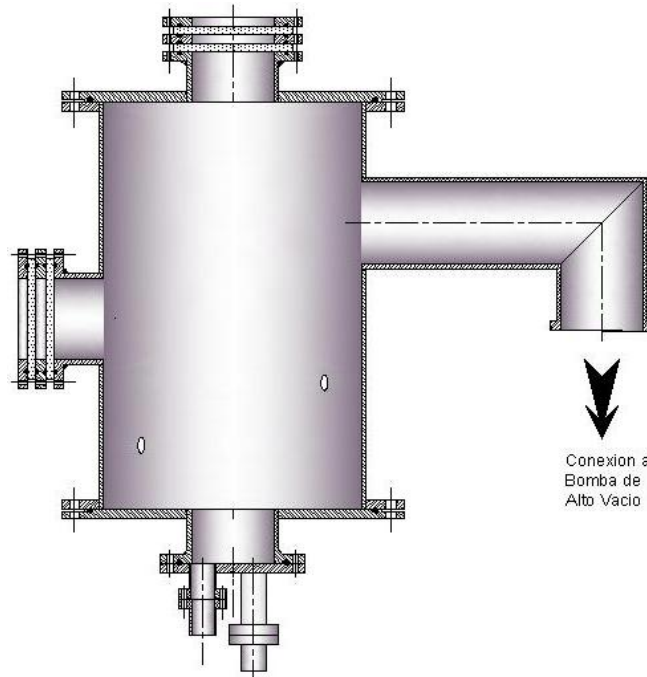


Figura 7 Corte longitudinal de la cámara ensamblada

2.8. Conexiones Laterales

Se cuenta con cinco (5) conexiones laterales sobre el cuerpo cilíndrico de la campana. Sobre una de ellas se conecta los conductores encargados de llevar la energía eléctrica de alta tensión a las piezas a tratar, sobre otras dos conexiones los conductores eléctricos encargados de alimentar al horno eléctrico. Una conexión es por la cual se incorporan los gases de proceso a la campana y la restante se utiliza para la instalación de termocuplas para la medición de temperaturas de procesos.

3. METODO CONSTRUCTIVO

Para la construcción de la cámara se roló la chapa de 4,7mm para obtener la forma cilíndrica, luego se la soldó con una pasada de raíz con soldadura TIG y luego se completo con pasadas de electrodo revestido. Finalizada esta tarea, se roló la pared del cuerpo cilíndrico a fin de asegurar su geometría.

Las tapas son de chapa AISI 316 de 12mm de espesor las cuales inicialmente se perforaron en su centro y luego se les soldó con TIG (internamente) el tubo de 4" con el soporte de las mirillas.

Para asegurar las dimensiones en el mecanizado de las tapas se toman de sus bridas

Se mecanizan los aros que serán los asientos de las tapas que van sobre el horno (además rigidizan). Para evitar la deformación de los aros durante la soldadura de estos sobre la cámara, se abulonan a las tapas y luego se procede a la soldarlos.

Una vez completado el cuerpo del horno con los dos asientos y las dos tapas, se procede a realizar por último, las conexiones laterales.

4. PRUEBA NEUMATICA DE ESTANQUEIDAD

Con el fin de determinar si existen fugas, dado que existen varias conexiones y bridas, lo más sencillo es colocar un manómetro y someter al equipo armado a una prueba neumática con 30 psi de de presión interna [9].

Daniel Ziegler; Nelson Mazini; Mauro Puccinelli; Cesar Lanz; Gustavo Albizua / Construcción de un horno de alto vacio para metalización de herramientas para mecanizado, de acero rápido e inserto de metal duro.

Para determinar si existe alguna fuga, se aplica agua jabonosa sobre todas las uniones soldadas y abulonada por los que en caso de existir formación de burbujas, se encontraría fácilmente el lugar de pérdida.

Por otro lado, si se dispone de tiempo, también se puede llevar la cámara a la presión de prueba y ver si existe caída de presión mediante un manómetro, a medida que pasan las horas.

5. EQUIPO GENERADOR DE ALTO VACIO

Se dispone de una bomba difusora de aceite con baffle refrigerado por agua para condensar los vapores de aceite de la difusora y una bomba mecánica a paletas marca LEYBOLD modelo TRIVAC.

El conjunto proporciona un vacío de 410 litros/segundo (modelo PD 410).

Para la indicación de la presión se cuenta con dos sensores del tipo Pirani y uno tipo Penning en conjunto con el medidor de presión COMBIVAC CM31.

6. CONCLUSIONES

- El horno de alto vacío fabricado permite la deposición de metales sobre el filo de herramientas de acero rápido. Se confeccionó con materiales de uso corriente y de bajo costo que se adquieren en el mercado local.
- El equipo construido permitirá estudiar sobre piezas metalizadas las propiedades finales de las mismas. Las variables que se manejarán son: temperatura de las piezas, tensión y corriente eléctrica, presiones de gases y tiempos de proceso; y se medirán espesores de capas depositadas, microestructuras obtenidas y dureza.
- Se analizará el comportamiento de herramientas de acero rápido recubiertas con distintas capas en procesos de mecanizado.
- El hecho de poder fabricar el equipo facilita la reparación del mismo sin recurrir a repuestos y manos de obra especializada de costo elevado.

7. REFERENCIAS

- [1] Yu. Lajtín, B. Arzamánov, Tratamiento Químico-térmico de los Metales, Ed. MIR, 1988.
- [2] R. F. Bunshah, Vacuum Metallurgy, Ed. Reinhold Publishing Corp., 1957.
- [3] Metals Handbook Surface Engineering, ASM, 1994.
- [4] I. Holland, Vacuum Deposition of Thin Films, Ed. John Wiley & Sons Inc., 1958.
- [5] Manual Kanthal, 1969.
- [6] J. Urquiza, Hornos Industriales a Resistencias. Teoría, Cálculo y Aplicaciones, Ed. Mc Graw-Hill, 1994.
- [7] W. Rohsenow, J. Hartnett, Handbook of Heat Transfer, Ed. Mc Graw-Hill, 1973.
- [8] E.F. Magyesy, Manual de Recipientes a Presión. Diseño y Cálculo, Ed. Limusa, 1989.
- [9] John Strong, Técnicas de Física Experimental. Tomos I y II, Ed. Eudeba, 1965.
- [10] Código ASME Sección 8 y Adendas.
- [11] R.E.Green, Machinery's Handbook, Ed. Industrial Press, 1996.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a los técnicos del Taller de Ingeniería y del Laboratorio de Metalurgia de la UNS, y a los alumnos de Ingeniería Industrial Juan P. Dodero y Federico Traversa, por su valiosa y desinteresada colaboración.