

Diseño de un reactor de plasma para deposición de TiN sobre herramientas de corte

Claudio Bunte¹, Afra Fernández Zuvich², Diego Fabián Zalcmán¹,
Carlos González Ferrari²

1 Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Ingeniería Industrial, Medrano 951, (C1179AAQ) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

2 Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba – Extensión Aulica Bariloche, Fanny T. de Newbery 111, (8400) San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina

cbunte@frba.utn.edu.ar

Recibido el 21 de junio de 2024, aprobado el 16 de julio de 2024

Resumen

Este trabajo, que se enmarca en un proyecto del Departamento de Ingeniería Industrial, propone el diseño de un reactor de plasma para deposición de nitruro de titanio (TiN) sobre herramientas de corte por el proceso de deposición física de vapor (PVD). En esta etapa de diseño del reactor, se incluye el análisis de dos esquemas de generación de vacío con sus ventajas y desventajas. El objetivo posterior es la construcción del reactor utilizando los resultados del diseño. Una vez instalado en el Laboratorio de Materiales en el Campus de la UTN-FRBA, tendrá como finalidad sumar no sólo material didáctico a las cátedras de los Departamentos de Ingeniería Industrial y Mecánica, sino también, la realización de tesis de doctorado y de tareas de apoyo tecnológico para industrias. Desde el punto de vista didáctico se busca introducir a los alumnos en las tecnologías de recubrimientos de superficies, las cuales mejoran las propiedades de resistencia al desgaste y a la abrasión de herramientas de corte. También se espera, que los resultados obtenidos puedan aplicarse a otros materiales con alto impacto tecnológico.

PALABRAS CLAVE: RECUBRIMIENTOS DUROS - REACTOR DE PLASMA - PROCESO PVD - NITRURO DE TITANIO

Abstract

This work, which is part of a project of the Department of Industrial Engineering, proposes the design of a plasma reactor for titanium nitride (TiN) deposition on cutting tools by the physical vapour deposition (PVD) process. The analysis of two vacuum generation schemes with their advantages and disadvantages is included in the reactor design stage. The subsequent objective is the construction of the reactor using the design results. Once installed in the Materials Laboratory on the UTN-FRBA campus, it will be used not only as a teaching tool for the chairs of the Industrial and Mechanical Engineering Departments, but also for PhD theses and technological support tasks for industry. From a didactic point of view, the aim is to introduce students to surface coating technologies that improve the wear and abrasion resistance properties of cutting tools. It is also expected that the results obtained can be applied to other materials with high technological impact.

KEYWORDS: HARD COATINGS - PLASMA REACTOR - PVD PROCESS - TITANIUM NITRIDE

1 Participaron en este trabajo los Dres. Fabián Álvarez y Javier Bergueiro

Introducción

La necesidad de producir componentes para utilizarlos en aplicaciones y ambientes donde se requiere el máximo rendimiento de los materiales ha incrementado la investigación y el desarrollo de mejores métodos de fabricación que satisfagan eficazmente las exigencias que demanda el elevado desarrollo tecnológico. Además, el desafío actual de reducir la huella de carbono requiere la implementación de procesos amigables con el medio ambiente y un mejor aprovechamiento de la energía; por ejemplo, utilizando herramientas de corte o mecanizado con un recubrimiento superficial adecuado que les proporcione una mayor vida útil (Kushner y Zank, 2021; Olschewski, 2010).

Las herramientas de corte deben reunir características básicas como alta resistencia al desgaste, conservación de la dureza a altas temperaturas, buena tenacidad y bajo coeficiente de fricción entre otras. Todos estos requisitos son muchas veces imposibles de lograr con un único material. Por este motivo, los fabricantes de herramientas utilizan generalmente un material de base que aporte tenacidad y sobre éste, se deposita un recubrimiento de un material de alta dureza, que tiene la finalidad de proporcionarle mayor resistencia al desgaste. Este recubrimiento, también puede aportar otras propiedades para aplicaciones específicas como por ejemplo aumentar la resistencia a la corrosión, introducir propiedades ópticas en la superficie recubierta o producir colores o texturas con finalidad decorativa (Rosnagel, *et al*, 1990).

Las principales características del material de recubrimiento deben ser: su alta pureza en la composición química, la calidad de su estructura de crecimiento y espesor apropiado, el cual estará comprendido en el rango de 0,1 a 10 μm .

Dentro de las tecnologías del plasma, se encuentran la deposición física en fase vapor (PVD, *Physical Vapor Deposition*) y la deposición química de vapor (CVD, *Chemical Vapor Deposition*). Para los recubrimientos superficiales de herramientas de corte, la deposición física en fase vapor (PVD) es la más utilizada, ya que no involucra reacciones químicas en los gases precursores. Además, la temperatura del proceso es menor a la del CVD. Por este motivo, el recubrimiento por PVD asistido por plasma se utiliza en la deposición de películas delgadas sobre metales y cerámicos mientras que el CVD asistido por plasma se aplica generalmente en la deposición de películas que no demandan propiedades tribológicas. Además de las técnicas de fabricación de recubrimientos superficiales de herramientas de corte, la tecnología de plasma se aplica para modificar la estructura química de la superficie, grabado, limpieza, activación superficial y deposición de películas delgadas sobre polímeros, entre otros materiales (Shul y Pearton, 2000).

Recubrimiento por Plasma - Proceso PVD

La deposición física en fase vapor o PVD, es una tecnología ampliamente utilizada en la deposición de películas delgadas sobre un sustrato para obtener depósitos con un mejor comportamiento tribológico, disminuyendo la fricción, mejorando las propiedades químicas y térmicas y finalmente aumentando la vida útil de dicho sustrato.

El proceso consiste en vaporizar materiales metálicos o cerámicos para depositarlos sobre el sustrato en forma de película delgada. El material a depositar se transforma en partículas atómicas mediante un proceso físico térmico o mediante colisiones y se dirige a los sustratos en un ambiente de vacío o plasma gaseoso en condiciones de baja presión, donde se condensan para formar un revestimiento físico (Seshan, 1988).

Las ventajas de utilizar procesos PVD son numerosas y permiten la variación continua de las características del recubrimiento en toda la película. También permite la deposición de aleaciones, composiciones multicapa y estructuras especiales (Decher y Schlenoff 2003). Esta versatilidad ha dado lugar a desarrollos, mejoras y proliferación de diferentes

técnicas. Dentro de estas, las más difundidas son las de pulverización catódica o *sputtering* y evaporación.

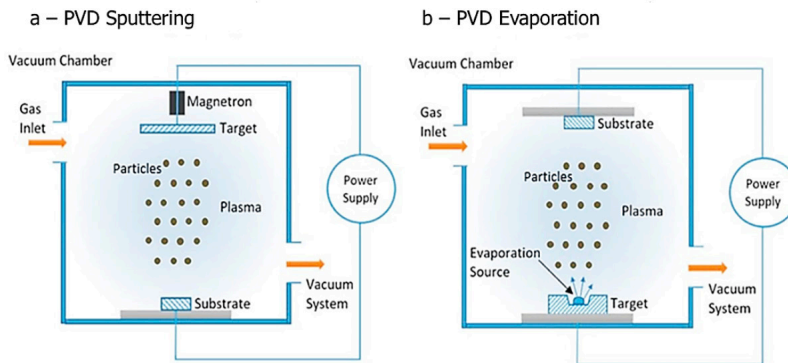


Fig. 1. Diagrama esquemático del método PVD por (a) *Sputtering* o pulverización catódica y (b) Evaporación (Baptista, 2018).

Como se observa en los diagramas de la Figura 1, el *sputtering* (Figura 1 (a)) implica la colisión de iones con un material objetivo para expulsar átomos, mientras que la evaporación (Figura 1 (b)), se basa en el calentamiento de un material fuente, sólido, por encima de su temperatura de vaporización. El *sputtering* ofrece una mejor calidad de película, uniformidad y cobertura por pasos, pero es más lento y complejo. En cambio, la evaporación es más rentable, ofrece mayores velocidades de deposición y es más adecuada para películas finas (entre $2\ \mu\text{m} < e < 5\ \mu\text{m}$), pero puede tener una calidad de película y una cobertura de uso inferiores. Por otro lado, el proceso de evaporación está limitado en cuanto a los materiales que pueden depositarse, en función de su temperatura de fusión y su presión de vapor. De acuerdo a la discusión anterior, la elección entre *sputtering* y evaporación depende de factores como el espesor de la película, las propiedades del material y la calidad deseada de la película. En la Tabla 1 se muestra una comparación entre las principales diferencias técnicas entre *sputtering* y evaporación (Baptista, 2018).

Tabla 1. Resumen de las características típicas de las técnicas de deposición de PVD: *Sputtering* y Evaporación

Parámetro de proceso	<i>Sputtering</i>	Evaporación
Vacío	Bajo	Alto
Absorción	Mayor absorción	Menos gas absorbido en la película
Partículas atomizadas	Dispersas	Altamente direccionales
Adhesión	Alta	Baja
Uniformidad del film	Mayor	Menor
Tamaño de grano	Pequeño	Grande
Energía de las especies depositadas	Puede ser alta (1-10 eV)	Baja (0,1-0,5 eV)
Tasa de deposición	Baja, excepto para metales puros y magnetron dual.	Puede ser muy alta (hasta 750.000 (Å/min))

Los procesos de PVD basados en *sputtering* son métodos que bombardean una superficie sólida con partículas energéticas, como iones acelerados, de manera que la colisión produce la emisión de átomos de la superficie del sólido, que luego son depositados sobre el sustrato. Este proceso, permite una mejor densificación de la película, debido a que los átomos inciden sobre el sustrato con mayor energía (40 veces más energía) que cuando se realiza por evaporación. En la Tabla 2 se puede ver un resumen de las principales técnicas de recubrimiento por PVD.

Tabla 2. Técnicas del recubrimiento por PVD

Sputtering		Evaporación	
Ions Beam		E-Beam	
Díodo		Inductivo	
Tríodo		Resistivo	
Sputtering Reactivo		Arco	Stirred
Deposición			Random (Aleatorio)
			Deposición por Arco Catódico
Magnetron	RF-Radio Frecuencia		
	DC-Corriente Continua		
	MEP-Plasma Mejorado Magnéticamente		
	UBMS-Unbalanced Enhanced Sputtering		
	DMS-Dual Magnetron Sputtering		
	HiPIMS-High Power Impulse/pulse Magnetron Sputtering		

Dentro de las técnicas de *sputtering* se encuentra la pulverización catódica con magnetron, el cual es un método bastante exitoso en la producción de películas de alta calidad y pureza a una velocidad de deposición razonable (Kiyotaka, W. y Shigeru, H. 1992). Por esta razón, el método de plasma seleccionado para el diseño del reactor propuesto es la pulverización catódica con magnetron (magnetron *sputtering*), en la que los átomos de gas inerte se ionizan y aceleran como resultado de la diferencia de potencial entre el objetivo, con polarización negativa (cátodo), y el ánodo. Las interacciones de los iones con la superficie objetivo provocan la eyección (pulverización) de átomos que se condensan sobre un sustrato y forman una película.

La descarga de pulverización catódica del magnetron es simplemente una disposición de pulverización catódica de diodos con la adición de imanes directamente detrás del objetivo del cátodo. Con la introducción de la pulverización catódica con magnetron, se superaron las desventajas de la pulverización catódica con diodos, como por ejemplo la baja tasa de deposición. Esto permite reducir la presión de operación manteniendo al mismo tiempo la energía de las especies pulverizadas, lo que a menudo daba como resultado propiedades mejoradas de la película (Gudmundsson y Lundin, 2020; Rosnagel, 2020).

Existen sistemas o configuraciones de pulverización catódica con magnetron: cilíndrico o plano. Los diagramas de estas configuraciones se muestran en la Figura 2.

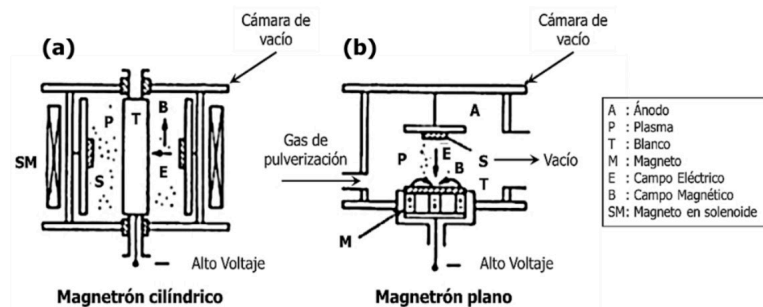


Fig. 2. Diagrama esquemático del método PVD por (a) Sputtering con magnetron cilíndrico o plano y (b) Sputtering con magnetron plano (Hideaki, et al, 2012).

Características del recubrimiento de TiN

La estructura de enlace en los nitruros de metales de transición consiste en una mezcla de componentes covalentes, metálicos e iónicos, y son los responsables de una alta dureza, excelente resistencia al desgaste, inercia química, buena conductividad eléctrica y propiedades superconductoras.

El interés por las películas delgadas de nitruros metálicos está creciendo rápidamente para aplicaciones tan diversas como recubrimientos resistentes al desgaste en herramientas de corte, recubrimientos de transmisión selectiva en vidrio arquitectónico y como barreras de difusión en circuitos integrados (Jindal *et al.*, 1999).

El nitruro de titanio (TiN) cristaliza en la estructura B1 NaCl y existe como una solución sólida que contiene nitrógeno en el rango entre 37,5 – 50,0 % at. (Figura 3).

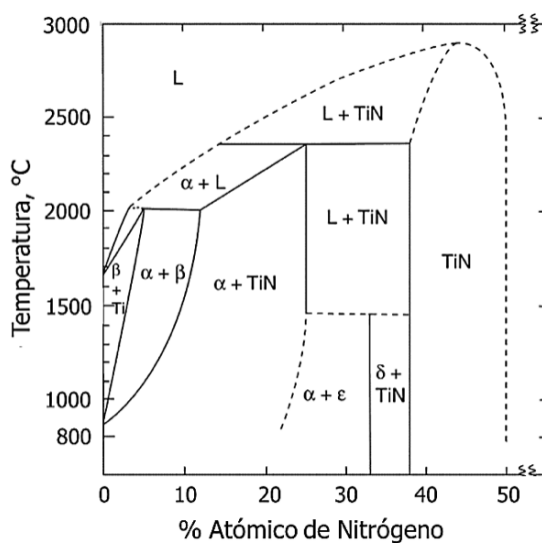


Fig. 3. Diagrama de equilibrio binario Ti-N (PalDey, et al, 2003).

El nitruro de titanio es un material cerámico muy duro (~ 85 HRockwell C), se oxida a 600 °C y tiene un punto de fusión de 2930 °C. Debido a estas propiedades, es usado como recubrimiento sobre componentes de aleaciones de titanio, acero, carburos y aluminio para mejorar las propiedades superficiales del sustrato.

Dependiendo del material del sustrato y el acabado superficial, el TiN tiene un rango de coeficiente de fricción de 0,4 a 0,9 contra sí mismo (sin lubricación). La formación típica tiene una estructura cristalina del tipo del NaCl en una proporción estequiométrica aproximada de 1:1. Aunque, los compuestos de TiN_x con x en el rango $0,6 \leq x \leq 1,2$ también son termodinámicamente estables.

Los métodos más comunes para el recubrimiento de TiN son la deposición de vapor física (PVD) (por lo general deposición por pulverización catódica, deposición por arco catódico o de calentamiento por haz de electrones) y la deposición química de vapor (CVD). En las técnicas PVD, el titanio pasa a la fase vapor y reacciona con el nitrógeno en la superficie del sustrato. Por otro lado, en CVD a diferencia del PVD se usa un gas precursor que contiene Ti como $TiCl_4$ o $Ti(CH_3)_4$ y se lo disocia por plasma.

Los recubrimientos técnicos típicos no superan los $10 \mu m$ ya que capas más gruesas tienen tendencia a desprenderse debido a la tensión residual. El material de base también debe poseer una alta resistencia a la compresión, de modo que la capa no se rompa en el punto de carga (Jindal, 1999; Silva, 2001; Aihua, 2012).

Diseño de la cámara del reactor

Si bien se han consultado diferentes trabajos sobre el diseño de la cámara del reactor (Manrique, 2006; García Molleja, 2011), se decidió tener en cuenta para el diseño preliminar de la cámara del reactor, las características de los equipos instalados en los Laboratorio de plasma de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo (UTN-FRH) (Figura 4 (a)) y del Laboratorio de Superficies del Departamento de Física Experimental del Centro Atómico Constituyentes (CAC-CNEA) (Figura 4 (b)), debido a los diferentes materiales utilizados para su construcción y por su experiencia en la aplicación de TiN. En el caso de la UTN-FRH, el reactor es un tubo de vidrio borosilicato mientras que el de CNEA es de acero AISI 304.

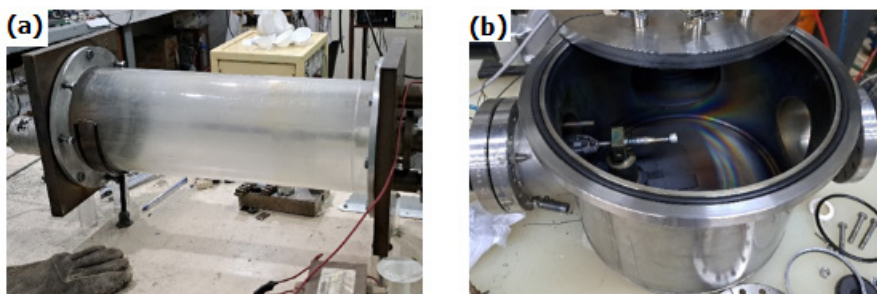


Fig. 4. Cámaras de los reactores de plasma instalados en los Laboratorios de Plasma de la (a) UTN-FRH y (b) en el Centro Atómico Constituyentes de CNEA.

Para determinar el mínimo espesor de pared, se realizó un cálculo de resistencia de materiales. Para ello se consideró una presión interna nula (cero) y la presión externa de 1 (una) atmósfera.

En las siguientes Tablas, de la 3 a la 6, se pueden apreciar los espesores resultantes del cálculo:

Tabla 3. Datos para el cálculo del espesor mínimo

Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Diámetro externo del recipiente cilíndrico	Do:	325	mm
Diámetro interno del recipiente cilíndrico	Dint:	315	mm
Espesor del recipiente cilíndrico	t:	5	mm
Alto o longitud del cilindro	L:	500	mm
Presión externa (1 atm)	P_ext:	0,1013	MPa
Temperatura interna	T_int:	200	°C
		473	K
		392	°F
Relación de aspecto (diámetro-espesor)	Do/t:	65	
Relación de aspecto longitud-diámetro)	L/Do:	1,538462	

Para relación de aspecto mayor a 20, la máxima P_ext admisible está dada por:			
Factor geométrico	Factor A:	0,0011	
Factor Material - Acero austenítico	Factor B:	4500	

Tabla 4. Resultado para el AISI 304

ACERO INOXIDABLE - SA-304			
Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Módulo elástico	E_SA_304:	2,03E+07	Psi
		140070	MPa
Presión externa máxima cilindro SA-304	Pext_max-SA_304:	104103	Psi
		7079	Atm
		104103	MPa
VERIFICA: Condición de máxima presión externa en cilindro de inox SA-304			

Tabla 5. Resultado para el Acrílico

ACRÍLICO			
Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Módulo elástico	E_acrílico:	4,49E+06	Psi
		30981	MPa
Presión externa máxima cilindro acrílico	Pext_máx-acrílico:	23025,64	Psi
		1566	Atm
		23026	MPa
VERIFICA: Condición de máxima presión externa en cilindro de acrílico.			

Tabla 6. Resultado para el Vidrio borosilicato

BORO SILICATO			
Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Tensión de rotura boro silicato	σ_u _boro_silicato:	7	MPa
Tensión admisible boro silicato	σ _acrílico:	1,75	MPa
Módulo elástico boro silicato	E_boro_silicato:	64000	MPa
Coefficiente de Poisson del boro silicato	η _boro_silicato:	0,2	
Espesor mínimo del cilindro de boro silicato	t_boro_silicato:	10	mm
Con un modelo FEM simplificado axisimétrico del cilindro de boro silicato se determinó el espesor mínimo necesario para no superar la tensión admisible calculada con un criterio de $1/4 * \sigma_u.B40$			

Los cálculos de los cilindros de acero y de acrílico fueron realizados según las ecuaciones de la metodología de diseño de ASME Sección VIII División 1: "Diseño por Regla", mientras que en el caso del vidrio borosilicato se realizó mediante un software de modelado (FEM) axisimétrico.

Simulación del plasma

La aplicación de recubrimientos superficiales permite una evidente mejora del comportamiento en servicio de las herramientas de corte y conformado, en términos de la resistencia al desgaste de la superficie, el aspecto de la superficie, la estabilidad química, el comportamiento a la fatiga y la adhesión al sustrato. Además, protege a los sustratos contra la abrasión, la erosión y la corrosión, disminuyendo los coeficientes de fricción y las tensiones residuales.

Debido a la gran importancia de estas características, se han realizado muchos estudios en el campo del modelado matemático y simulación numérica de recubrimientos. Los dos métodos utilizados para la simulación del proceso de recubrimiento por plasma (PVD) son:

- FEM (Método de elementos finitos) basado en los procesos del reactor.
- CFD (Dinámica computacional de fluidos), basado en el producto y sus características.

Las simulaciones computacionales, FEM y CFD, son utilizadas para comprender, optimizar o resolver problemas mediante aproximaciones matemáticas a un entorno de estudio real, con un entorno gráfico amigable. Aunque con muchas restricciones en cuanto al uso de herramientas de simulación, como la inversión en el software, el conocimiento necesario para trabajar con él y el control del proceso, la simulación ha ayudado y ayudará a resolver muchos problemas (Pinto, 2018; Gravesa, 2003; Zhang, 2020).

Existen muchos programas de simulación, para FEM y CFD, que permiten predecir diferentes aspectos tanto de los procesos del plasma como de los recubrimientos realizados. En este trabajo se utilizó el software de simulación SiMTra, modelo RSD2013 (Strijckmans y Depla, 2014). Como se puede ver en la Figura 5, se consideró para el *setup* experimental una cámara de reactor cúbica de 50 cm de lado dentro de la cual se ubicaron el magnetrón y la placa de Widia de 25 mm x 25 mm a una distancia de 100 mm de separación.

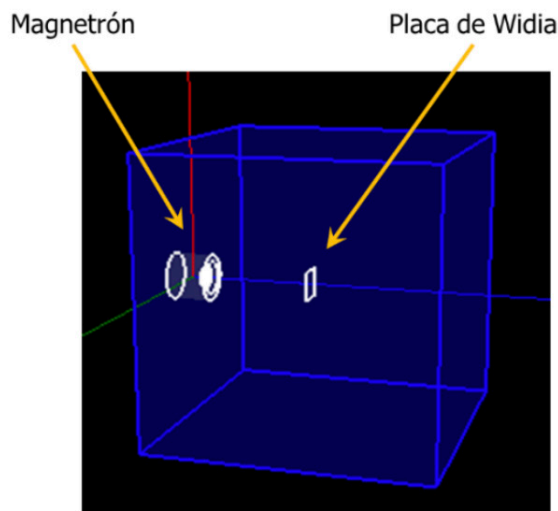


Fig. 5. Setup de la cámara del reactor.

Se realizaron 2 (dos) simulaciones de plasma generado por medio de la descarga eléctrica en gas nitrógeno, a baja presión, con un blanco de titanio puro cuyos parámetros fueron:

- Presión de nitrógeno 5×10^{-3} mbar,
- diferencia de potencial de 400 V,

- corriente de 0,2 A y
- temperatura del gas residual es de 300 K

En la primera simulación se utilizó un número de partículas emitidas desde el blanco del magnetrón de 1×10^8 partículas y en la segunda, 1×10^9 partículas respectivamente. La duración de la primera simulación fue de 4 (cuatro) horas mientras que la duración de la segunda fue de 1 (un) día.

Se consiguió estimar un espesor de deposición, tomando en cuenta la proporción de partículas emitidas (1×10^8 y 1×10^9 según corresponda) respecto de las que llegan a la superficie de la placa a recubrir, de 1 (un) μm en un tiempo de 15 min.

En las Figuras 6 y 7, se muestra el número de partículas que se depositan por cada $0,01 \text{ mm}^2$ de la placa (cuadrada) de Widia para las simulaciones 1 y 2 respectivamente.

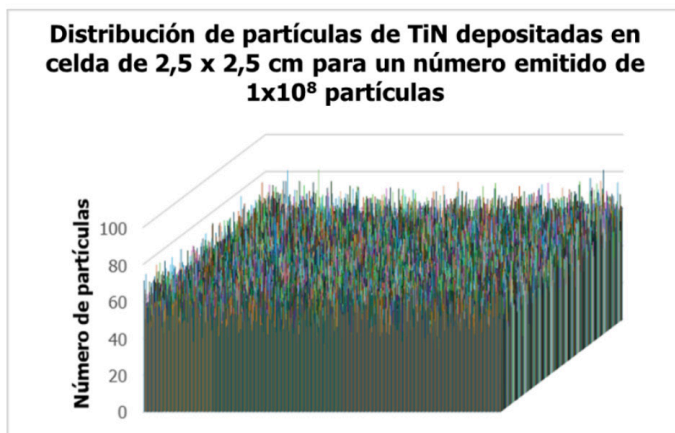


Fig. 6. Número de partículas que se depositan por cada $0,01 \text{ mm}^2$ de la placa (cuadrada) de Widia para un número emitido de 1×10^8 partículas.

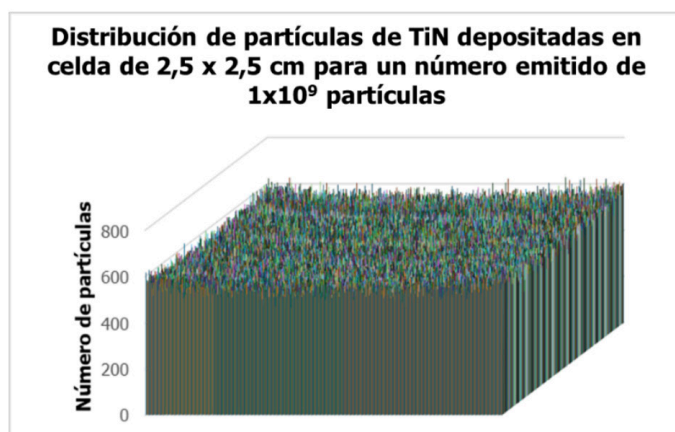


Fig. 7. Número de partículas que se depositan por cada $0,01 \text{ mm}^2$ de la placa (cuadrada) de Widia para un número emitido de 1×10^9 partículas.

En las Figuras 8 y 9, se muestra la distribución de energía de impacto de las partículas de TiN sobre la superficie de la placa de Widia de 2,5 x 2,5 cm para el caso de emisión de 10^8 (simulación 1) y 10^9 partículas (simulación 2), respectivamente.

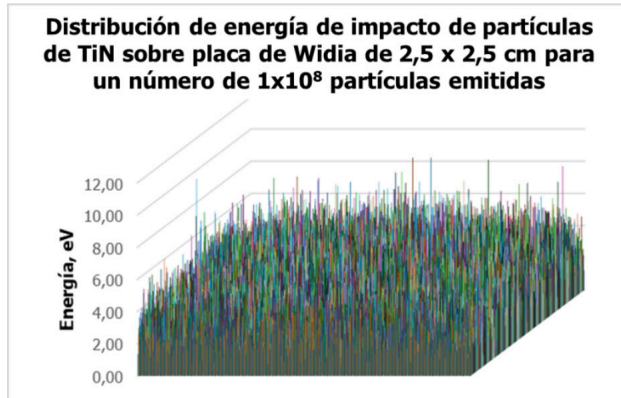


Fig. 8. Distribución de la energía con la que llegan las partículas para un para un número emitido de 1×10^8 partículas.

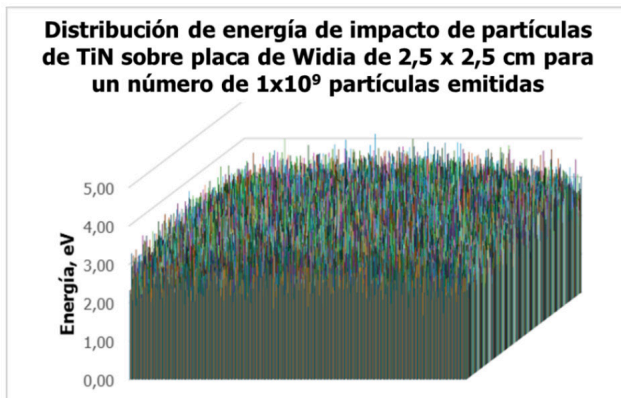


Fig. 9. Distribución de la energía con la que llegan las partículas para un para un número emitido de 1×10^9 partículas.

Sistema de vacío

Para la generación del vacío interno de la cámara del reactor, se analizan dos sistemas para alcanzan niveles de vacío del orden del 1×10^{-6} mbar.

- a. Bomba de vacío de con paletas en baño de aceite más columna de bombeo de alto vacío (bomba difusora).
- b. Bomba Scroll de bajo vacío más turbo molecular.

Para el sistema de bombeo se evaluaron dos configuraciones distintas, con y sin aceite, cuya diferencia en los costos es significativa. Si bien el equipamiento que utiliza aceite es más económico, tiene el inconveniente de la contaminación del recubrimiento debido al carbono del aceite vaporizado. Dicho inconveniente puede minimizarse con el agregado de una trampa de aceite.

Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer de esta etapa de diseño preliminar de un reactor de plasma para uso didáctico y para desarrollo de tesis de doctorado son las siguientes:

1. La técnica de plasma seleccionada fue: Magnetron *sputtering*. Para esto se tuvo en cuenta no sólo la bibliografía sino la experiencia de los dos laboratorios de plasma contactados (UTN-FRH y CAC-CNEA).
2. En base al diseño estructural preliminar de la cámara del reactor se analizaron diferentes materiales como acero inoxidable austenítico y vidrio borosilicato, con los que se construyeron los reactores de los laboratorios consultados. Para este proyecto se considerará la utilización de acero inoxidable.
3. De acuerdo con lo analizado en el punto anterior, se elegirá cuando se cuente con el presupuesto adecuado la opción de bombeo a través del sistema Bomba Scroll y turbo molecular.
4. La simulación del depósito de TiN mediante el software SiMTra permitió determinar, según cálculos realizados, el rango de tiempos necesarios para una deposición de un recubrimiento de un espesor mínimo de 1 (un) μm con los parámetros de presión, tensión y corriente mencionados.
5. De la comparación de las dos simulaciones se puede decir también que se observa (tal como es esperado) una mejora de la distribución de partículas sobre la superficie de la pieza a recubrir, a medida que se aumenta la cantidad de partículas emitidas. Lo que se traduciría en términos prácticos, en un espesor de recubrimiento más uniforme y homogéneo.

Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente a los integrantes de los Laboratorios de la UTN-FRH, el Laboratorio de Superficies del Depto. de Física Experimental del CAC - CNEA y Gerencia de Área de Investigación, Desarrollo e Innovación – CAC - CNEA.

Referencias

- AIHUA, Liu *et al*, (2012). Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 31, 82–88. Elsevier
- BAPTISTA, A. *et al*, (2018). On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. *Procedia Manufacturing* 17 (2018) 746-757. Elsevier.
- DECHER, G. Y SCHLENOFF, J. B., (2003). *Multilayer Thin Films - Sequential Assembly of Nanocomposite Materials*, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2003), ISBN: 3-527-30440-1.
- GARCÍA MOLLEJA, J.; ROMERO-GÓMEZ, P. y FEUGEAS, J. N., (2011). Construcción de un reactor de nitruración por plasma y simulación de la distribución de temperaturas. 11^o Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales, Rosario, Argentina.
- GRAVESA, D. y KUSHNERB, M., (2003). Influence of modeling and simulation on the maturation of plasma technology: Feature evolution and reactor design. *J. Vac. Sci. Technol. A* 21(5), Sep/Oct. American Vacuum Society.
- GUDMUNDSSON, J. y LUNDIN, D., (2020). Introduction to magnetron sputtering. High Power Impulse Magnetron Sputtering. Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications. Pages 1-48. Elsevier.
- HIDEAKI, A. *et al*, (2012). *Handbook of Sputter Deposition Technology Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nanomaterials, and MEMS*. 2^o Edition Copyright © Elsevier Inc.
- JINDAL, P. C. *et al*, (1999). Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 17. 163–170
- KIYOTAKA, W. y SHIGERU, H., (1992). *Handbook of sputter deposition technology. Principles, Technology and Applications*. Noyes Publications. New Jersey. USA.
- KUSHNER, M. J. y ZANK, G. P., (2021). *PLASMA SCIENCE. Enabling Technology, Sustainability, Security, and Exploration*. The National Academies Press.
- MANRIQUE, M. *et al*, (2006). Diseño y evaluación de un reactor de plasma térmico para síntesis de nitruro de aluminio. *Facultad de Ingeniería de la U.C.V. (Universidad Simón Bolívar)*, 21(2), 75–83.
- OLSCHEWSKI, E. S., (2010). Aplicaciones de la física de plasmas en la industria. *Ingeniería Industrial*, (28), 195-210.
- PALDEY, S. *et al*, (2003). Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. *Materials Science and Engineering A342*. 58-79. Elsevier.
- PINTO, G. (2018) Numerical Simulation Applied to PVD Reactors: An Overview. *Coatings*. MDPI. <https://www.mdpi.com/2079-6412/8/11/410>.
- ROSSNAGEL, S. M.; CUOMO, J. J. y WESTWOOD, W. D., (1990). *Handbook of Plasma Processing Technology*. Noyes Publications, New Jersey.
- ROSSNAGEL, S., (2020). Magnetron sputtering. *J. Vac. Sci. Technol. A* 38, 060805 (2020); <https://doi.org/10.1116/6.0000594>
- SESHAN, K., (1988) *Handbook of Thin-Films Deposition Processes and Techniques*, (9). Ed. K. Schuegraf, Noyes Publications, NEW JERSEY.
- SHUL, R. J. y PEARTON, S. J., (2000). *Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques*. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- SILVA, F. J. G., (2001). Estudo da estrutura e comportamento tribológico de revestimentos duros e ultra-duros executados no vácuo (in Portuguese), Master Thesis, FEUP, (2001).
- STRIJCKMANS, K. y DEPLA, D., (2014). A time-dependent model for reactive sputter deposition *Journal of Physics D: Applied Physics*. 47 235302
- ZHANG, Y. *et al*, (2020). Multiscale computational fluid dynamics modeling and reactor design of plasma-enhanced atomic layer deposition. *Computers and Chemical Engineering* 142. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107066>