

EFFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL MOLDE EN EL ELECTROFORMADO DE MICROPIEZAS POR UV-LIGA

EFFECT OF MOLD GEOMETRY IN MICROPARTS ELECTROFORMING BY UV-LIGA

JUAN C. GAVIRIA VILLA

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. jcgaviri@unal.edu.co

JOHNATAN M. CASTELBLANCO

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, jmcastel@unal.edu.co

LUZ M. OCAMPO CARMONA

Profesora, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, lmocampo@unal.edu.co

SERGIO LOPERA

Estudiante de Doctorado en Ingeniería eléctrica, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Sao Paulo, Brasil

Recibido para revisar enero 26 de 2009, aceptado marzo 19 de 2009, versión final abril 21 de 2009

RESUMEN: UV-LIGA es una técnica versátil que permite la fabricación de piezas metálicas con alta relación de aspecto (alto/ancho) mediante la combinación del procesamiento fotolitográfico de un polímero y la electroformación de un metal al interior de las cavidades grabadas en el polímero. Esta técnica de bajo costo es empleada en una gran variedad de áreas que comprenden la microfluídica, la óptica, la instrumentación, el moldeo de plásticos y las telecomunicaciones, entre otras. Para aproximar a Colombia a estas tecnologías modernas de procesamiento de materiales, el Grupo de Ciencia y Tecnología de Materiales ha iniciado un proceso de apropiación de técnicas de microfabricación, específicamente, este artículo presenta los resultados de la implementación de la técnica UV-LIGA para la fabricación de micropiezas de Níquel y examina los efectos de la geometría del molde en la velocidad de crecimiento e integridad de los depósitos obtenidos, parámetros que son importantes para conseguir la fabricación de piezas micrométricas complejas que den origen a dispositivos con aplicaciones comerciales.

PALABRAS CLAVE: Microfabricación; UV-LIGA; Micropiezas; Níquel.

ABSTRACT: UV-LIGA is a versatile technique which allows the fabrication of metal parts with high aspect ratio (height / width) through the combination of a photolithographic processing of a polymer and the electroforming of a metal inside the cavities engraved in the polymer. This low-cost technique is used in a variety of areas including microfluidic, optics, instrumentation, plastic molding and telecommunications, among others. To approximate Colombia to this modern technologies for materials processing, the Materials Science and Technology Group has started an appropriation process of microfabrication techniques, specifically, this paper presents the results of UV-LIGA technique implementation for the fabrication of Nickel microparts, and examine the effects of mold geometry on the growing speed and integrity of the obtained deposits, important parameters in order to achieve the fabrication of complex micrometric parts that leads to devices with commercial applications.

KEYWORDS: Micro-fabrication; UV-LIGA; Microparts; Nickel.

1. INTRODUCCIÓN

La deposición electroquímica es la aplicación industrial más antigua de una reacción electroquímica; mediante ésta técnica se depositan metales puros o aleaciones de metales a partir de la reducción asistida de sus iones en solución, permitiendo obtener capas con propiedades eléctricas, mecánicas o magnéticas especiales, y conseguir superficies con brillo, color y resistencia a la corrosión [1].

Con la combinación de las técnicas microlitográficas evolucionadas a partir de la microelectrónica y las técnicas químicas de deposición de metales, surge a comienzos de los 80s la técnica de microfabricación llamada LIGA, acrónimo alemán litografía e impresión galvánica. En esta técnica, películas gruesas de una resina son irradiadas con rayos X a través de una máscara de amplitud, consiguiendo definir cavidades en la resina que luego son rellenas con metal electrodepositado para formar estructuras con alta relación de aspecto [2].

Posteriormente surgieron técnicas similares a LIGA que emplean alternativas de bajo costo para sustituir la costosa litográfica de rayos X, entre estas técnicas se encuentra la UV-LIGA que usa radiación ultravioleta y fotopolímeros de alta transparencia para la producción de moldes de alta relación de aspecto, que luego son llenados con níquel electroformado, como lo indica la figura 1.

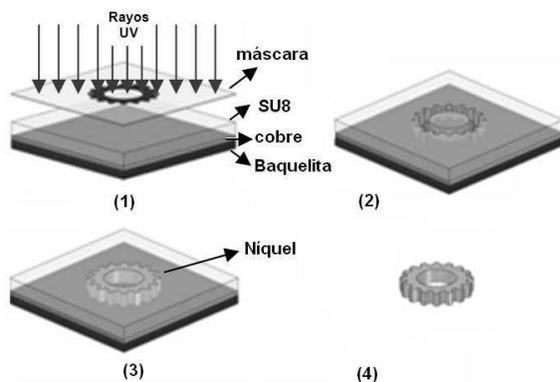


Figura 1. Secuencia de fabricación de una micropieza por la técnica UV-LIGA

Figure 1. Outline of a micropart manufacturing by UV-LIGA technique.

La velocidad a la cual el metal es depositado en el proceso de electroformado depende del transporte de los iones de níquel en la solución, el cual a su vez es afectado por parámetros como la temperatura, el pH, la agitación, la intensidad del campo eléctrico entre otros fenómenos. La cantidad de iones de níquel reducidos está relacionada directamente con la carga transferida siguiendo la ley de Faraday de la electrólisis, de la cual podemos deducir la relación entre la tasa de llenado del molde R y la densidad de corriente i , así:

$$R[\mu\text{m h}^{-1}] = 3.6 \cdot 10^4 \cdot k_1 \cdot Z \cdot i / \rho ,$$

donde k_1 es la eficiencia del proceso, $Z=M/\eta F$ es el equivalente electroquímico de la sustancia y ρ es su densidad; con M el peso molecular, n el número de electrones que participan, y F la constante de Faraday ($96.485 \text{ C mol}^{-1}$).

Para el caso de la electrodeposición de níquel ($\rho = 8.9 \text{ g cm}^{-3}$) Ni^{2+} , $n=2$, $M = 58.71 \text{ g mol}^{-1}$, $Z = 3 \cdot 10^{-4} \text{ g C}^{-1}$, la tasa de llenado para una densidad de corriente de 10 mA.cm^{-2} , asumiendo una eficiencia en el proceso del 95% la cual es típica para el níquel, es aproximadamente $11,5 \mu\text{m h}^{-1}$.

Sin embargo, debido a efectos de borde, las densidades de corriente pueden variar de punto a punto sobre una muestra, dependiendo de la geometría del patrón transferido a la resina [3]. Esto puede conducir a velocidades de crecimiento desiguales en un mismo molde, demandando etapas posteriores de pulido para nivelación de las alturas.

En este trabajo se evalúa la influencia del tamaño y la forma de los moldes fabricados, sobre la velocidad de crecimiento e integridad de los depósitos obtenidos mediante la técnica UV-LIGA, como etapa importante en el proceso de apropiación de esta técnica, para avanzar hacia la fabricación de dispositivos con geometrías complejas.

2. MATERIALES Y METODOS

A continuación se describen detalladamente todas las etapas del protocolo experimental.

2.1 Microlitografía

Los moldes para la electrodeposición fueron fabricados mediante microlitografía en películas espesas de SU8, empleando como sustrato placas para circuito impreso (cobre sobre baquelita) cortadas en cuadrados de 4.6 cm de lado.

El proceso de Microfotolitografía se llevó a cabo en una cabina de flujo laminar con filtrado de aire, para evitar la presencia de partículas contaminantes.

Se emplearon de los siguientes equipos durante el proceso litográfico: una placa calentadora, un *spinner* para la aplicación del fotopolímero y una lámpara de mercurio de 200W.

La figura 2 muestra el diseño utilizado como máscara para realizar las pruebas, el cual consiste en arreglos de círculos, cuadrados, rectángulos y triángulos con tamaños de 50, 200 y 500 μm .

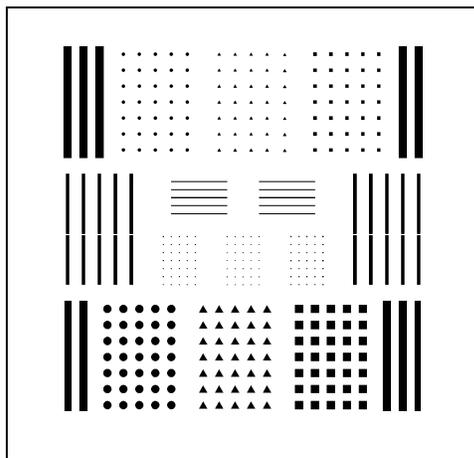


Figura 2. Diseño de la máscara
Figure 2. Mask design

Para la impresión de este patrón se empleó un *photoplotter* de la industria gráfica con una densidad de 2400 dpi sobre película positiva de alto contraste. A pesar de que el *photoplotter* realiza un barrido horizontal con espaciado de 10 μm , presenta dificultades a la hora de obtener patrones circulares, este efecto no es crítico en los moldes de 200 y 500 μm pero ocasiona una definición inaceptable en las figuras de 50 μm , como se aprecia en la figura 3.c y 3.d. Debido a la

dificultad antes expuesta se desconsideraron los resultados obtenidos para los moldes de 50 μm .

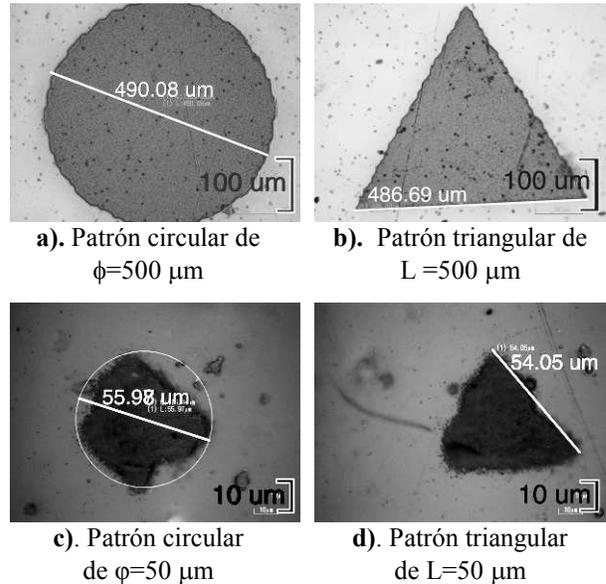


Figura 3. Micrografías ópticas de la máscara impresa
Figure 3. Optical micrographs of the printed mask

A continuación se listan las etapas del proceso fotolitográfico para el polímero foto-sensible conocido con el nombre de SU8 [4]:

1. Limpieza de la superficie del cobre mediante lijado y ataque químico, seguido de limpieza con acetona y alcohol iso-propílico.
2. Aplicación de una película del promotor de adherencia *Omnicoat*¹, girando a 3000 rpm por 30 segundos, seguido de un horneado a 200 °C por un minuto para evaporar los solventes del *Omnicoat*.
3. Aplicación de una capa de SU8-2100¹ a 1500 rpm durante 30 segundos para un espesor de 200 μm , seguida de la remoción manual del exceso de SU8 en los bordes del sustrato.
4. Homogenización de la capa de SU8 mediante horneado a 75 y 115 °C por tiempos de 5 y 25 minutos respectivamente, en un ambiente cerrado y saturado de solvente de SU8.
5. Evaporación del solvente de la resina SU8 mediante horneado a 115 °C, por 45 minutos, seguida de un enfriamiento de la muestra hasta temperatura ambiente.
6. Exposición de la muestra a través de la máscara, utilizando la lámpara ultravioleta con una dosis de alrededor de 600 mJ cm^{-2} .

7. Curado del SU8 expuesto con una rampa de temperatura entre 75 e 155 °C por un tiempo total de 30 minutos.
8. Enfriamiento lento del polímero, para evitar la generación de tensiones internas que puedan causar el desprendimiento o fractura de la estructura polimerizada.
9. Revelado por inmersión en *SU8-Thinner*¹ por 2 minutos seguido de inmersión en *SU8-Developer*¹ con agitación ultrasónica por 10 minutos y finalizando con limpieza ultrasónica en alcohol iso-propílico.
10. Horneado a 150°C por 5min para secar y endurecer el molde fabricado.

2.2 Electroformado

Para la electrodeposición del níquel se empleó un baño Watts estándar [5], cuya composición se resume en la Tabla 1, a una temperatura de 52°C, un pH de 3.5 y una densidad de corriente promedio de 60 mA/cm², condiciones encontradas como óptimas en proyectos de investigación anteriores, ver [6], [7] y [8].

El electroformado se llevó a cabo en una celda electrolítica construida para tal fin, con calentamiento en baño María y agitación magnética. Se utilizó como contra-electrodo un recuadro de 5x5cm de níquel electrolítico dispuesto verticalmente paralelo a la muestra, como lo indica la Figura 4.

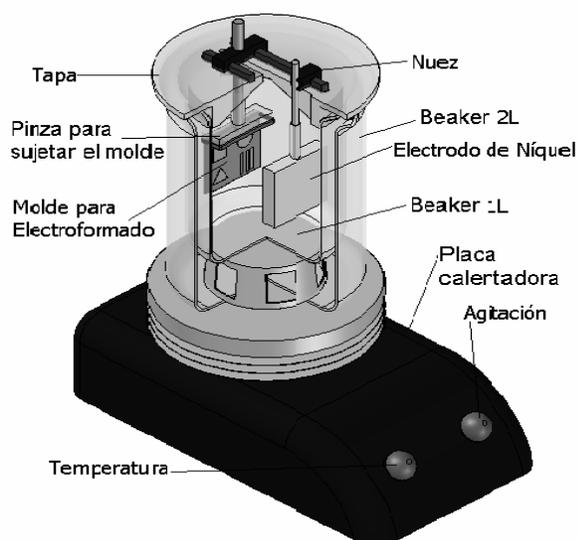


Figura 4. Esquema de la celda electroquímica.
Figure 4. Sketch of the electrochemical cell

Tabla 1. Composición del baño WATTS
Table 1. Composition of WATTS Bath

Reactivo	Concentración
Sulfato de níquel hexahidratado (NiSO ₄ ·6H ₂ O)	340 g.L ⁻¹
Cloruro de níquel pentahidratado (NiCl ₂ ·5H ₂ O)	45 g.L ⁻¹
Acido Bórico (H ₃ BO ₃)	hasta ajustar pH=3.4
Lauril sulfato	1 g.L ⁻¹

El tiempo de electroformado calculado para una altura de 200µm con una densidad de corriente de 60 mAcm⁻² fue de aproximadamente 3 horas.

2.3 Corte Transversal y Metalografía

Para analizar los perfiles de crecimiento y las características microestructurales del metal depositado, las muestras fueron embutidas en baquelita, cortadas y pulidas como lo ilustra la Figura 5.

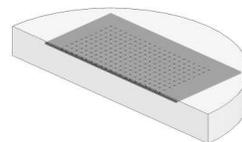


Figura 5. Esquema del corte de las muestras.
Figure 5. Sketch of sample cutting

El protocolo de corte y pulido es descrito a continuación:

1. Montaje de las muestras en baquelita, para proteger los depósitos y facilitar el pulido, utilizando una prensa de montaje SimpliMet® 3000, de la Buehler.
2. Corte transversal con disco de diamante en una cortadora IsoMet® de la Buehler.
3. Pulimiento en secuencia con lijas de granulometría de 200, 300, 400 y 600. (Luego de esta etapa se tomaron las micrografías para el análisis geométrico y se continuó con los pasos 4-6 para el análisis metalográfico).
4. Pulimiento con paño rotativo, utilizando partículas de polvo de diamante de 3µm.
5. Pulimiento con paño, utilizando la máquina VibroMet® 2, de la Buehler, para el acabado final.

6. Ataque químico con una solución conteniendo: 50 ml ácido clorhídrico, 10 g de sulfato de cobre y 50 ml de agua destilada, siguiendo la norma ASTM E407.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Figura 6 presenta micrografías de los moldes obtenidos, los cuales copiaron fielmente los patrones de la máscara, con un ligero suavizado de los bordes debido a efectos difusivos durante el curado. Incluso las estructuras de 50µm consiguieron ser transferidas al molde, por tanto la resolución y calidad de la máscara constituyen la limitante del actual proceso litográfico.

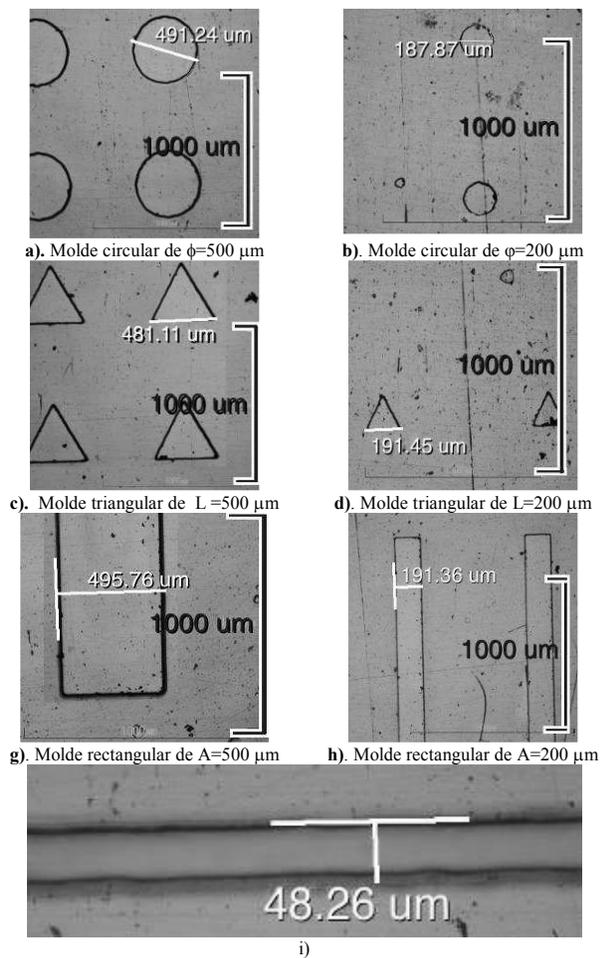


Figura 6. Moldes utilizados para la deposición de la micropiezas de níquel

Figure 6. Casts used for the deposition of microparts nickel

Para verificar la ausencia de residuos orgánicos en la superficie del cobre al interior de las cavidades se inspeccionaron los depósitos después de los primeros 10 minutos de electroformado (Figura 7), encontrando áreas circulares con cobre aun expuesto lo cual indica la presencia de un material dieléctrico enmascarando el proceso; comúnmente se presentan residuos de SU8 o restos de revelador en los moldes de alta relación de aspecto, los cuales pueden ser removidos con plasma o inmersión controlada en acetona [9], sin embargo dichos residuos aparecen próximos a los bordes, no hacia el centro de las áreas reveladas, además la utilización de la película de OMNICOAT facilita la completa remoción del SU8 de las cavidades.

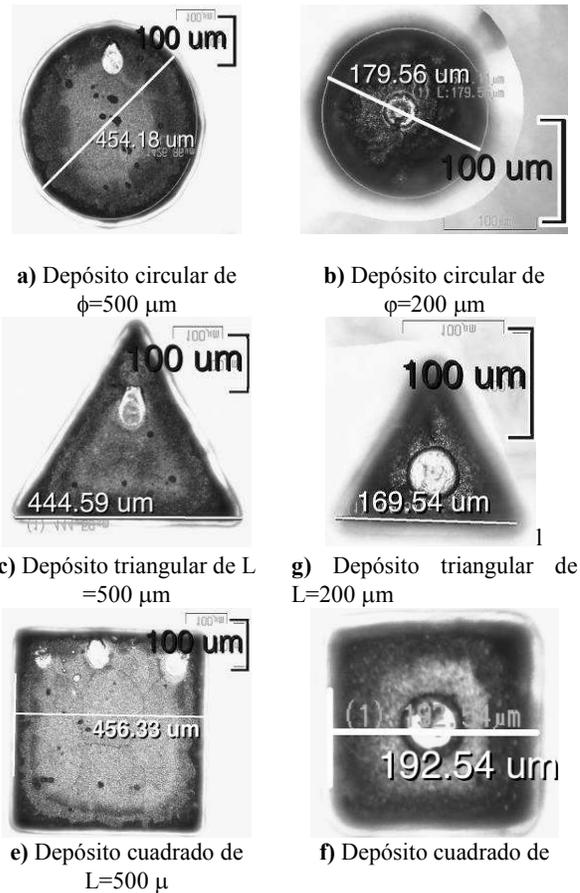


Figura 7. Depósitos de níquel de 3 µm de espesor

Figure 7. Nickel Deposits with thickness 3 µm

Otra característica observada en estos defectos es su ubicación no aleatoria, destacando que en los todos los moldes de 500µm el defecto presenta en

la parte superior en cuanto que para los moldes de $200\mu\text{m}$ se ubican en el centro. Esto sugiere que los espacios no depositados que se aprecian en la Figura 7 pueden deberse a burbujas de hidrógeno generadas en la superficie del cobre y que quedaron adheridas en el centro o se desplazaron verticalmente hacia arriba y permanecieron durante los 10 minutos de la deposición.

En la Figura 8 se presenta la sección transversal de los diferentes tipos de estructuras depositadas, para un tiempo de deposición de 3 horas. En las micrografías a, c y e de la Figura 8 se aprecian cráteres y poros circulares, atribuibles a burbujas de hidrógeno apresadas que sugieren que el régimen de agitación no es el adecuado para la densidad de corriente utilizada, requiriendo modificar el tipo de agitación o incrementar el contenido de surfactante.

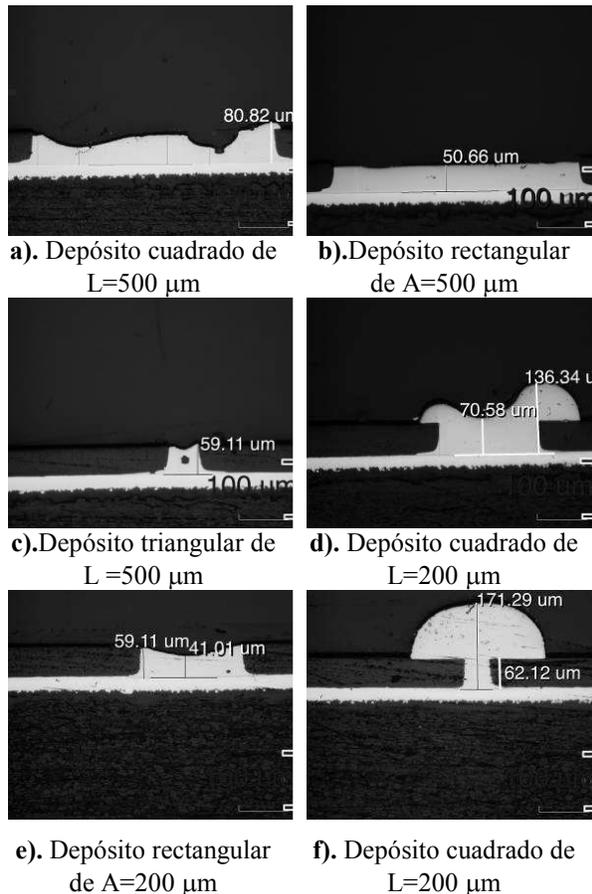


Figura 8. Sección trasversal de los depósitos de níquel
Figure 8. Transversal Section of nickel deposits

De las micrografías es evidente que la velocidad de llenado de los moldes es altamente influenciada por las dimensiones de la cavidad. A

pesar de haber sido depositados simultáneamente, los moldes de $500\mu\text{m}$ se encuentran apenas llenos, los de $200\mu\text{m}$ ya comienzan a desbordarse y los de $50\mu\text{m}$ tienen una sobre-deposición exagerada. También es apreciable que para una misma dimensión la geometría también es importante, siendo por ejemplo más lento y homogéneo el crecimiento en los moldes rectangulares que en los moldes cuadrados.

Lo anterior confirma que existe un efecto de concentración de líneas campo en los bordes la deposición que hace que la densidad de corriente y por tanto la velocidad de crecimiento sea mayor hacia las paredes del molde.

En la figura 9 se presenta los resultados del ataque químico para revelar la estructura de granos del níquel depositado. Se observa que la los tamaños y formas de los granos son bastante similares y por tanto las diferencias locales en la densidad de corriente no modifican notablemente las características estructurales del metal.

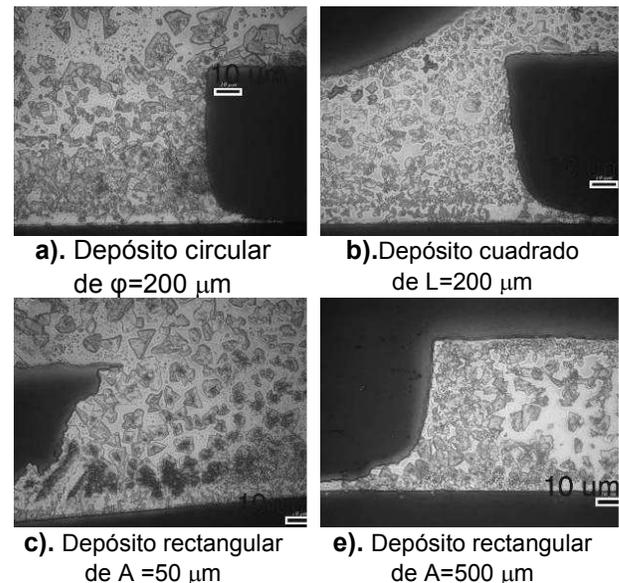


Figura 9. Microestructuras en la sección transversal de algunas de las micropiezas

Figure 9. Microstructures in cross-section of some of the microparts

En las imágenes de los cortes transversales se observó que las paredes de los moldes no están completamente rectas y que presentan un exceso de revelado en la base; esto es debido a la atenuación de la radiación ultravioleta en la

profundidad de la resina lo cual indica que el tiempo de exposición es insuficiente para polimerizar correctamente la parte inferior de los moldes. Lo anterior constituye otro problema de utilizar las impresiones de la industria gráfica como máscara, ya que si se aumentase más el tiempo de exposición de las regiones oscuras de la impresión que no bloquean completamente los rayos UV, comienzan también a sensibilizar regiones indeseables entorpeciendo el revelado de los moldes.

Finalmente, como primera muestra de la aplicación de la técnica UV-LIGA implementada en este proyecto, se presenta en la figura 10, un dispositivo fabricado en níquel con el mismo protocolo de fabricación antes descrito, donde las estructuras mínimas son líneas con un ancho de 50 μm . Este dispositivo es la configuración de un actuador electro-termo-mecánico con potenciales aplicaciones en alineación de fibras ópticas y modulación de señales.



Figura 10. Micro-Actuador Térmico
Figure 10. Thermal Micro-Actuator

4. CONCLUSIONES

Se ha verificado que la forma y tamaño de los moldes afectan radicalmente la distribución local de densidades de corriente, lo cual conduce a un crecimiento no homogéneo de las micropiezas. Es importante continuar estudiando estos efectos y las alternativas para corregirlos o compensarlos, que incluyen: variaciones de las condiciones de deposición, utilización de corrientes pulsadas o utilización de aditivos en la solución electrolítica.

El presente trabajo ha permitido la adaptación exitosa de la técnica UV-LIGA a los equipos, insumos y condiciones actuales de trabajo la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, consiguiendo producir piezas de geometría simples con dimensiones mínimas de 50 μm , acercando al País a la apropiación de tecnologías avanzadas de procesamiento de materiales, que puedan ser de utilidad en la solución de problemas industrial, acumulación de capacidades tecnológicas que disminuyan la brecha científica y económica nos separa de los países desarrollados.

Para mejorar el proceso de fotolitografía se hace necesario cambiar el tipo de máscara utilizado, pudiendo por ejemplo intentarse una reducción óptica de la impresión aquí utilizada, transfiriéndola por proyección a una película metálica o trabajar en el desarrollo de sistemas de litografía directa (*Maskless*).

5. AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Investigaciones - DIME de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por el apoyo financiero dado al proyecto que permitió la realización de este artículo. A los técnicos del Laboratorio de Caracterización de Materiales por su invaluable ayuda en la preparación de las muestras.

REFERENCIAS

- [1] DATTA, M. Applications of electrochemical microfabrication: An introduction. IBM Journal of Research & Development, Vol. 42 Issue 5, 563-576, 1998.
- [2] MALEKA, CHANTAL KHAN et al. Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and systems: a review. Microelectronics Journal, Vol. 35, 131-143, 2004.
- [3] MEHDIZADEH S., et al. The Influence of Lithographic Patterning on Current Distribution: A Model for Microfabrication by Electrodeposition; J.Electrochem. Soc., Vol. 139, 78-91, 1992.

- [4] MICROCHEM; Processing Guidelines for SU-8 2100. Disponible en: <http://www.microchem.com/products/pdf/SU-82000DataSheet2100and2150Ver5.pdf> [citado el 23 de Octubre de 2008].
- [5] MORDECHAY, S. et al. Modern Electroplating. Ed John Wiley & Sons, 4-Edition. 2000.
- [6] GONZALEZ, J. et al. Implementación de una técnica de Microfabricación por deposición electroquímica de Níquel. Proyecto Dime (Dirección de Investigaciones U.N sede Medellín). 2004-2005.
- [7] FALCO, J. et al. Eletrodeposição de Níquel sobre Microestruturas obtidas com o Processo Liga. In: XXIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Lourenço. Brazilian Journal Of Physics, 2000.
- [8] LOPERA, SERGIO. Fotolitografía en capas espesas (20-500 μ m) de SU8, para la fabricación de micro-estructuras. Tesis de Maestría Universidad Nacional de Colombia, 64-74, 2007.
- [9] M AGARWAL, R A GUNASEKARAN, P COANE AND K VARAHRAMYAN. Scum-free patterning of SU-8 resist for electroforming applications J. Micromech. Microeng. 15 No 1 130-135, 2005.