

Microconformado de Materiales Metálicos mediante Pulsos Láser en el Dominio de ns

O. García⁽¹⁾, M. Morales⁽¹⁾, J.J. Garcia-Ballesteros⁽¹⁾, J.A. Porro⁽¹⁾,
C. Molpeceres⁽¹⁾, A.M. Sánchez-Pérez⁽²⁾, J.L. Ocaña⁽¹⁾

⁽¹⁾Centro Láser UPM. Campus Sur UPM. Ctra. de Valencia, km. 7,300.
Edificio La Arboleda 28031 Madrid SPAIN
Tel.: (+34) 913365540. Fax: (+34) 913365534. email: oscar.garciag@upm.es

⁽²⁾Laboratorio de Metrología y Metrotecnica, Universidad Politécnica de Madrid
C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid SPAIN

Resumen

La demanda de miniaturización introducida, entre otros, por la industria de fabricación de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), hace necesario caracterizar y validar los procesos que emplean el láser en el microconformado de materiales metálicos a escala submilimétrica. Como alternativa al microconformado térmico, que hace uso de las deformaciones de origen térmico inducidas por la radiación láser, el microconformado mediante pulsos láser en el dominio de ns hace posible el conformado de materiales metálicos manteniendo, o incluso mejorando, las propiedades mecánicas de los mismos debido a la inducción de tensiones residuales de compresión en la superficie de la pieza tratada. Se presenta en este trabajo el estudio teórico y experimental del microconformado láser mediante la caracterización de diversas pruebas elementales.

Palabras Clave: Microconformado láser, simulación FEM, microfabricación.

Abstract

Miniaturization of components demanded by MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) industry, makes necessary the validation of the manufacturing processes applied to submillimetric metallic materials in which laser is used. As an alternative to thermal microforming in which laser induced thermal fields are responsible for the forming phenomena, the use of ns laser pulses makes possible microforming of metallic materials preserving, or even improving, their mechanical properties, due to the induction of residual stresses in the surface. In the present paper experimental tests and FEM simulation results on nanosecond time scale laser microforming are presented.

Keywords: Laser micro-scale peen forming, forming mechanism, numerical modelling.

1. Introducción

La creciente demanda en la fabricación de MEMS introduce nuevos requerimientos en cuanto a las tecnologías de producción. Los procesos de montaje implicados requieren elevadas precisiones, gran reproducibilidad y bajos costes de producción. El posicionamiento y ajuste preciso de los componentes miniaturizados se considera clave en el campo de la microfabricación. Dado que los microcomponentes son habitualmente de difícil manipulación y muy sensibles a los esfuerzos mecánicos, los procesos de

ajuste mediante láser que no precisan contacto con la pieza ofrecen un gran potencial en este campo.

El conformado láser, que alude normalmente al conformado térmico [1-5], utiliza la distorsión térmica inducida por el láser para conformar piezas metálicas sin utilización de herramientas o intervención de fuerzas externas.. No obstante, los efectos térmicos asociados hacen difícil mantener las propiedades materiales de las piezas tratadas debido entre otros a cambios no deseados en la microestructura, recristalización y transformaciones de fase, [3]. El conformado láser por ondas de choque hace uso de la onda de choque inducida por la radiación láser como medio para modificar la curvatura de la pieza tratada [6]. Posee las ventajas del conformado térmico (ausencia de contacto, no necesidad de herramientas y alta precisión y eficiencia), pero su naturaleza no térmica hace posible mantener o incluso mejorar las propiedades del material induciendo tensiones residuales de compresión sobre la pieza tratada, lo que se traduce en una mejora de parámetros industrialmente relevantes como la resistencia a la fractura, corrosión y fatiga. [6,7].

En este trabajo se estudia el microconformado mediante ondas de choque generadas por pulsos láser sobre una lámina metálica delgada investigando experimentalmente el efecto de la posición y energía del pulso en el mecanismo de deformación y haciendo uso de los datos obtenidos para validar un modelo predictivo de simulación.

2. Descripción del modelo

El modelo de cálculo está integrado por dos módulos que analizan el fenómeno desde sendos enfoques complementarios.

- LSPSIM, un modelo unidimensional concebido para la estimación de la onda de presión sobre el material resultante de la aplicación sobre el mismo de ondas de choque generadas por láser. El modelo resuelve el sistema de ecuaciones acoplado energía-impulso sujeto a las condiciones térmicas y fluidodinámicas impuestas por la energía aplicada por el láser.
- HARSHOCK, que, sobre la base del perfil de presión dependiente del tiempo calculada por LSPSIM, resuelve el problema de la propagación de la onda de choque en el sólido considerando de modo específico la respuesta del material a las alteraciones térmicas y mecánicas inducidas por la onda de choque. Para la resolución del modelo planteado se hace uso de una versión 3D del código

HARDSHOCK, adaptada para su empleo mediante la herramienta comercial de cálculo por elementos finitos (FEM) ABAQUS®, siguiendo como estrategia de cálculo una integración explícita en el instante inicial, seguida de la integración implícita para el análisis de las tensiones residuales en el equilibrio.

En los procesos de tratamiento con ondas de choque el material se somete a tensiones y deformaciones de modo dinámico superándose velocidades de deformación de 10^6 s^{-1} . En estas condiciones las relaciones estáticas tensión-deformación no tienen validez para caracterizar la respuesta del material, por lo que se hace uso en su lugar del límite elástico dinámico propuesto por Johnson y Cook [10].

La geometría introducida en el modelo de simulación se muestra en la Figura 1 y corresponde con la incidencia de un haz láser uniforme de forma cilíndrica sobre una superficie plana uno de cuyos extremos se encuentra encastrado (“pinned end”) como condición de contorno. El tipo de elemento utilizado para la simulación es C3D8R.

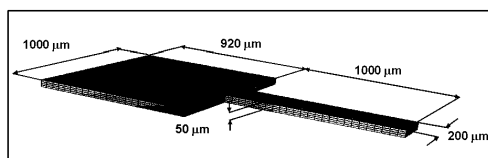


Figura 1. Geometría del modelo

3. Resultados numéricos

El modelo descrito se ha aplicado al estudio del efecto de la energía del pulso láser y la posición del disparo sobre el ángulo neto de doblado de la patilla metálica de acero AISI 304, estimando la presión de plasma resultante con ayuda de LSPSIM. El modelo de simulación refleja que la deformación plástica inducida por la onda de choque genera una distribución de tensiones residuales de compresión en la dirección del haz (S11) sobre la superficie de incidencia y de tracción en la cara inferior de la misma.

3.1. Análisis de la influencia de la energía en el ángulo de doblado.

En la Figura 2 se muestra el ángulo de doblado para diferentes valores de la energía por pulso. Cuando la energía excede un determinado valor, la deformación de la zona base del encastrado tiene un efecto atenuador sobre el ángulo neto de doblado

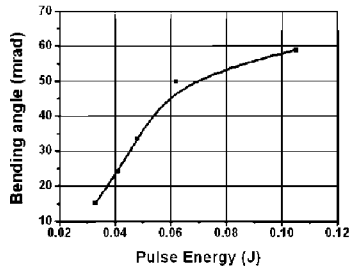


Figura 2. Variación del ángulo de doblado para diferentes valores de energía por pulso

3.2. Análisis de la influencia de la posición del pulso en el ángulo de doblado

Un segundo efecto analizado por medio del modelo FEM descrito, es el producido por la posición del pulso al incidir sobre la pieza.

Como resultado de la combinación de los dos principales mecanismos acoplados, esto es, una deformación angular local producida por la evolución de la onda de choque sobre la lámina y un doblado global debido a la tensión de cizalla producida por la presión aplicada lejos del encastre, se obtiene un máximo del ángulo de doblado cuando el pulso se aplica a una distancia $L/3$ (siendo L la longitud de la patilla) medida desde el extremo encastrado (para las energías consideradas, la unión entre cada lámina y el material base actúa como un encastre). Esto se muestra en la Figura 3.

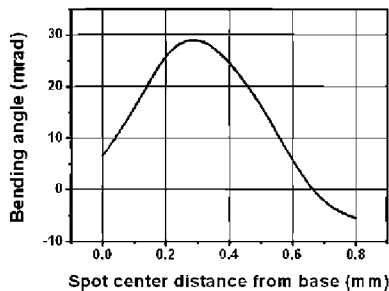


Figura 3. Ángulo de doblado en función de la posición del pulso

4. Resultados experimentales

Haciendo uso de un láser Nd:YAG a 1064 nm operando a una frecuencia de 10Hz y con un ancho temporal de pulso de 9,4 ns., se hicieron incidir pulsos de 1,05 J sobre la superficie de interacción mediante un espejo reflector y una lente de enfoque. De cara a

obtener un tamaño de spot más pequeño ($175\ \mu\text{m}$) y reducir la energía incidente ($33\ \text{mJ}$ por pulso), se situó una máscara de radio $750\ \mu\text{m}$ delante de la lente de enfoque.

Al objeto de validar el modelo numérico, la muestra se irradió haciendo variar la posición de incidencia del pulso según se muestra en la Figura 4. El ángulo de doblado se incrementa según el pulso se acerca a la posición de $L/3$ medido desde el extremo encastrado, y decrece cuando se sitúa hacia el extremo libre de la lámina.

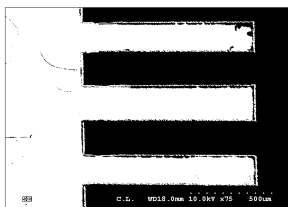


Figura 4. Imagen SEM de probeta de ensayo mostrando diversas posiciones del pulso.

La deformación de cada patilla se caracteriza dimensionalmente utilizando microscopía confocal láser. Los perfiles observados experimentalmente son coherentes con el modelo numérico predictivo según se muestra en la Figura 5.

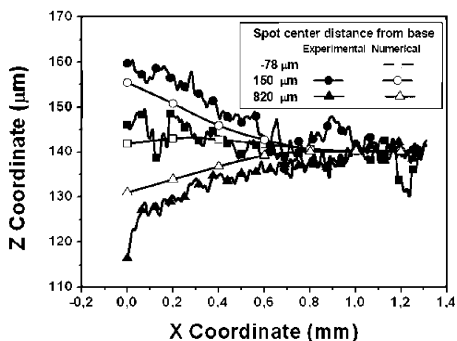


Figura 5. Perfiles obtenidos experimentalmente y comparación con modelo teórico.

5. Conclusiones

Se ha demostrado experimentalmente la viabilidad del microplegado láser de láminas metálicas delgadas por medio de pulsos láser en el dominio de ns.

Las simulaciones muestran la presencia de dos mecanismos de doblado que compiten: una deformación angular local en la zona de incidencia y en la dirección del haz debido a la deformación plástica localizada y una deformación angular global en la dirección

opuesta al haz de incidencia debido a la tensión de cizalla producida en la lámina desde el borde encastrado.

La simulación numérica confirma como parámetros críticos del proceso:

- Energía del pulso: para energías por pulso que exceden de un determinado valor, la deformación angular global predomina perdiendo el ángulo neto de doblado local su importancia relativa.
- Distancia del centro de impacto del pulso (spot) al encastre: se obtiene un máximo en el ángulo de doblado global para pulsos aplicados a $L/3$ medido desde la base.

Los perfiles obtenidos mediante microscopía confocal son coincidentes con los resultados del modelo numérico predictivo.

Los resultados y la experiencia recabada por los autores indican que el uso de pulsos láser en el dominio de ns puede constituir una herramienta adecuada para el microconformado de materiales metálicos con aplicación directa en la fabricación de numerosos componentes utilizados en MEMS.

6. Referencias

1. F. Vollertsen et al.: *Journal of Materials Processing Technology*, 151 (2004) 70.
2. J. Widlaszewski in M. Geiger, A. Otto (Eds), *Laser assisted Net Shape Engineering 4*, Meisenbach-Verlag, 2004, p.1083
3. M. Dirscherl et al.: *J. Laser Micro/Nanoengineering*, 1, (2006) 50
4. M. Schmidt, et al.: *J. Laser Applications*, 19 (2007) 124.
5. M. Geiger, F. Meyer Pittroff in I. Miyamoto, Y. F. Lu, K. Sugioka, J.J. Dubowski (Eds), *Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication*. Proceedings of SPIE Volume: 4426, 2002, DOI: 10.1117/12.456823.
6. W. Zhang et al.: *ASME Transactions of the ASME*, Vol. 126 (2004), 10
7. J.L. Ocaña, C. Molpeceres, M. Morales and A. García-Beltrán, in C.R. Phipps, M. Niino (Eds), *High-Power Laser Ablation II SPIE Proceedings*, Vol. 3885, (2000), 252.
8. J.L. Ocaña, C. Molpeceres, M. Morales and M.A. Moreno, in M Geiger and A Otto (Eds.). *Laser assisted Net Shape Engineering 3*, Meisenbach-Verlag, 2001, p. 199.
9. J.L. Ocaña et al.: *Appl. Surf. Sci.*, 238 (2004) 242.
10. G.R. Johnson and W.H. Cook, *Int. J. Eng. Fract. Mech.*, 21 (1985) 31

7. Agradecimientos

Trabajo parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Proyectos PSE020400-2006-1, PSE020400-2007-2 y CIT0205002005-11.