

# Análisis de Tensiones Residuales Inducidas en Aleaciones Metálicas por Tratamientos Superficiales mediante Ondas de Choque Generadas por Láser

J.A. Porro<sup>(1)</sup>, M. Morales<sup>(1)</sup>, C. Molpeceres<sup>(1)</sup>,  
A.M. Sánchez-Pérez<sup>(2)</sup>, J.L. Ocaña<sup>(1)</sup>

(1) Centro Láser UPM. Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.  
Edificio La Arboleda Ctra. de Valencia, km. 7,300. 28031 Madrid. SPAIN  
Tel.:(+34) 913365541, email: [japorro@etsii.upm.es](mailto:japorro@etsii.upm.es)

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

## Resumen

En el presente artículo se plantea un estudio sobre la medida de tensiones residuales mediante el método del taladro en banda extensométrica (o agujero ciego) aplicado en probetas de aluminio 2024-T351, previamente tratadas superficialmente mediante laser shock processing (método de tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, conocido como LSP). Finalmente, se realiza una comparación entre los resultados experimentales obtenidos al medir las tensiones residuales obtenidas en probetas tratadas mediante LSP y los valores obtenidos mediante un modelo de simulación.

**Palabras Clave:** Tratamiento Superficial por Ondas de Choque Generadas por Láser, Tensiones Residuales, Método del Taladro en Banda Extensométrica.

## Abstract

In the present paper a study about the residual stresses measurement using the hole drilling method in aluminium 2024-T351 test pieces is presented. Previously, test pieces have been treated using laser shock processing (surface treatment using laser induced shock waves known as LSP). Finally, a comparison between the experimental results obtained by measuring the residual stresses in test pieces treated using LSP and the values obtained using a simulation model has been made.

**Keywords:** Residual Stresses, Laser Shock Processing, Improvement of Mechanical Properties, Hole Drilling Method.

## 1. Introducción

Los procesos de tratamiento superficial de materiales metálicos mediante ondas de choque generadas por láser (conocidos como laser shock processing, laser shock peening o LSP) se han convertido, en los últimos años, en una alternativa competitiva a los métodos de mejora de las propiedades mecánicas mediante generación de campos de tensiones residuales de compresión empleados tradicionalmente (perdigoneado o shot peening).

En el presente artículo se presentan los resultados de la medida de tensiones residuales en probetas de aluminio 2024-T351 previamente tratadas mediante LSP. Para

comprobar la validez de las medidas experimentales realizadas se han comparado con los resultados numéricos obtenidos a través de la simulación de dichos procesos mediante el sistema de cálculo desarrollado por los autores.

## **2. El tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser**

Un pulso láser de elevada intensidad (del orden de GW) enfocado sobre la superficie de un material metálico forma un plasma de elevada temperatura que inmediatamente se propaga generando, por conservación de la cantidad de movimiento, una onda de choque de elevada amplitud que se propaga hacia el interior del material provocando deformaciones plásticas permanentes que son las responsables de la inducción de un campo de tensiones residuales de compresión [1]. Para aumentar la intensidad de la onda de choque se confina el plasma de tal forma que permanece más tiempo en contacto con la superficie del metal aumentando el impulso efectivo de la onda de choque. El medio confinante usado habitualmente es el agua [2].

Algunos autores sugieren el empleo de un recubrimiento absorbente (pintura negra) a la radiación láser con el fin de proteger la superficie de la pieza. La mejora del proceso utilizando este recubrimiento absorbente no ha sido demostrada por lo que en el presente estudio no se ha empleado.

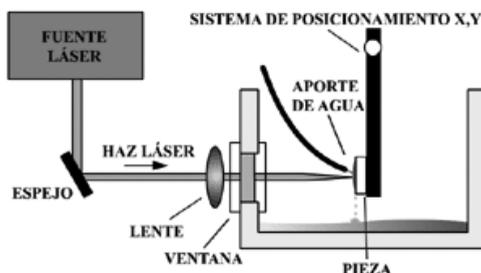
## **3. Montaje experimental**

En las instalaciones de LSP del Centro Láser de la UPM se dispone de un láser de estado sólido (Nd:YAG) pulsado (10 hercios). La energía es de 1.9 Julios por pulso y en ancho de pulso es de 9 nanosegundos. Es posible trabajar a diferentes longitudes de onda mediante la utilización de un generador de armónicos pero en el experimento del presente artículo se irradió únicamente en infrarrojo (1064 nanómetros).

El pulso láser se guía hacia la superficie metálica de la probeta mediante un espejo y se enfoca mediante un lente. La forma de la mancha focal es circular y su tamaño es de 1.5 milímetros de diámetro.

El medio confinante empleado es agua que se suministra en forma de chorro de agua con control de caudal. El agua se recoge en una vasija de metacrilato que se vacía de forma continua en un desagüe. Para realizar el recubrimiento de áreas extensas es necesario mover la probeta mediante un sistema de posicionamiento programable XY.

El solape programado de pulsos permite la realización de recubrimientos con diferentes intensidades de tratamiento. En la Figura 1 se puede observar un esquema del montaje experimental de LSP disponible en el Centro Láser de la UPM [3,4].



*Figura 1. Esquema del montaje experimental de LSP disponible en el Centro Láser de la UPM*

#### **4. Medida de tensiones residuales**

Existen diferentes técnicas de medida de tensiones residuales pero las más empleadas son la difracción de rayos X y el método del taladro en banda extensométrica. Cada una de las técnicas tiene sus ventajas e inconvenientes pero para la medida de tensiones residuales en profundidad se recomienda el empleo del método del taladro en banda extensométrica ya que la difracción de rayos X se limita a medidas muy cercanas a la superficie (salvo en el caso que se realice un complejo decapado químico).

El método del taladro en banda extensométrica consiste en realizar un taladro en el centro de una banda extensométrica de tres elementos especialmente diseñada para medir tensiones residuales. Las lecturas obtenidas son causadas por la relajación de las deformaciones del material que están relacionadas con las tensiones residuales iniciales. Empleando ecuaciones especiales de reducción de datos se calculan las tensiones residuales principales y su orientación a partir de las microdeformaciones medidas.

La norma ASTM E837-01 [5] desarrolla un procedimiento para la realización de medida de tensiones residuales mediante el método del taladro en banda extensométrica pero presenta limitaciones cuando se requiere realizar medidas en materiales cuyas tensiones son variables con la profundidad (como es el caso de materiales tratados mediante shot peening o LSP). Por ello, se han desarrollado métodos complementarios de reducción de datos que permiten calcular las tensiones residuales a partir de las deformaciones medidas en materiales con tensiones residuales variables con la profundidad.

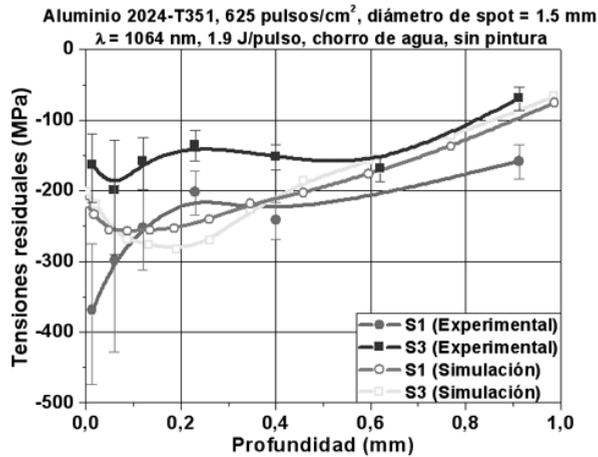
Para campos de tensiones residuales variables con la profundidad se recomienda el empleo del método integral [6]. Se requieren diferentes conjuntos de coeficientes para relacionar los cambios de la deformación superficial con las tensiones residuales para cada profundidad de la tensión y profundidad del agujero. En el método integral, el cálculo de estos coeficientes se realiza mediante un cálculo mediante el método de elementos finitos. Los datos necesarios para calcular las tensiones residuales a partir de las microdeformaciones medidas en las direcciones de los tres elementos son el diámetro final del agujero, el módulo de Young del material y el coeficiente de Poisson.

El software disponible en el Centro Láser de la UPM para calcular las tensiones residuales [7] a partir de las microdeformaciones medidas permite estimar la incertidumbre de las tensiones obtenidas teniendo en cuenta cuatro de las fuentes de incertidumbre experimental. Las cuatro fuentes de incertidumbre son [8]:

- Incertidumbre asociada al valor del módulo de Young empleado.
- Incertidumbre asociada a la medida del diámetro final del agujero.
- Incertidumbre asociada a la medida de las microdeformaciones.
- Incertidumbre asociada a la medida de la profundidad en cada uno de los incrementos.

## **5. Resultados y conclusiones**

En la Figura 2 se presenta una gráfica donde se comparan los resultados de la medida experimental de tensiones residuales a partir el método del taladro en banda extensométrica, para una probeta de aluminio 2024-T351 tratada mediante LSP con un solape de 625 pulsos/cm<sup>2</sup>, con los resultados obtenidos mediante la simulación del proceso a través del sistema de cálculo SHOCKLAS. Las barras de incertidumbre representadas en la gráfica son las calculadas por el software de cálculo de tensiones residuales a partir de las estimaciones de los valores de las distintas fuentes de incertidumbre anteriormente citadas.



*Figura 2. Estudio comparativo de las tensiones residuales medidas experimentalmente para probetas de aluminio 2024-T351 tratadas mediante LSP con un solape de 625 pulsos/cm<sup>2</sup> y las obtenidas mediante simulación a través del sistema de cálculo SHOCKLAS*

En la gráfica se observa como en la zona cercana a la superficie es donde los valores simulados y experimentales difieren más. Esta zona es crítica desde el punto de vista experimental por la dificultad de la detección del cero en profundidad y es donde se acumula una mayor incertidumbre. Por otro lado, S1 y S3 (tensiones residuales en la dirección de las resistencias 1 y 3) presentan en la simulación unos valores muy similares mientras que en las medidas experimentales se observa una diferencia importante. Este contraste es debido a que las propiedades del material empleados en la simulación son las de un material homogéneo e isotrópico. En cambio, el material empleado en el ensayo experimental ha sido sometido previamente a procesos de conformado (laminación) por lo que las propiedades del material no son las mismas que las utilizadas en el modelo simulado.

De forma general se puede concluir que los resultados obtenidos experimentalmente mediante el método del taladro en banda extensométrica concuerdan esencialmente con los resultados de la simulación del proceso obtenidos a través del sistema de cálculo SHOCKLAS.

## 6. Referencias

1. Clauer, A.H., Fairand, B.P., “Interaction of laser-induced stress waves with metals”. Presentado en Proc. ASM Conference Applications of Lasers in Materials Processing; Washington DC; 1979.
2. Sano, Y., Mukai, N., Sudo, A. y Konagai, C., “Underwater laser processing to improve residual stress on metal surface”, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Welding Symposium of Japan Welding Society, Nagoya, Japón, 1996.
3. Ocaña, J.L. et al.: “Predictive assessment and experimental characterization of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in laser shock processed metallic alloys”. In: High-Power Laser Ablation V, Phipps C.R., Ed.. SPIE Vol. 5548, 642-653 (2004).
4. Ocaña, J.L. et al.: “Laser Shock Processing as a Method for Surface Properties Modification of Metallic Materials”. In: Shot Peening and other Mechanical Surface Treatments. V. Schulze, A. Niku-Lari, Eds. I.I.T.T. Paris, 466-471 (2005).
5. ASTM 2002 Annual book of ASTM standards, v.03.01 No. E837-01. “Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method”.
6. Schajer G. S., “Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method: Part I & II Stress calculation procedures”, J. Eng. Mater.-T. ASME 110, 338-349 (1988).
7. Schajer G. S., H-Drill software, V 2.33, Vishay Measurements Group.
8. Grant, P.V., Lord, J.D. and Whitehead, P.S., “The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique”, NPL Good Practice Guide No.53, August 2002.

## 7. Agradecimientos

Trabajo subvencionado parcialmente por MCYT (Proyecto DPI2005-09152-C02-01) y EADS-España.