

Holografía digital aplicada para la evaluación de pastilla de metal duro

Applied digital holography for evaluating hard metal chip

José Luis Valin-Rivera^I, Jaime M.-Monteiro^{II}, Mario Augusto Pires-Vaz^{III}, Hernani M.-Lopes^{III}, Reginaldo Teixeira-Coelho^{IV}, Federico Martinez-Aneiros^{V†}, Meyli Valin-Fernández^{VI}, Edison Gonçalves^{VI}

I. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Mecánica. Valparaíso, Chile

II. Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial-INEGI. Porto, Portugal

III. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal

IV. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Produção. São Paulo, Brasil

V. Universidad Tecnológica de La Habana. La Habana, Cuba

VI. Universidade de São Paulo, Departamento de Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos São Paulo. Brasil

Correo electrónico: jose.valin@pucv.cl

Recibido: 12 de agosto de 2016

Aceptado: 29 de noviembre de 2017

Resumen

El objetivo de este trabajo consistió en la aplicación de un método óptico interferométrico para la evaluación del desgaste en una pastilla de metal duro. Se describe el esquema experimental para la aplicación de la técnica de la Holografía Digital utilizada para el registro de los hologramas digitales en una cámara CCD (Dispositivo de Carga Acoplada). La pastilla inspeccionada con la técnica óptica fue previamente montada en una estructura de soporte y ligeramente calentada con una lámpara de halógeno para evidenciar las regiones con defecto o desgaste. Para el procesamiento de las imágenes, se utilizó el software, ProlTec. Fue

posible detectar, con alta resolución y sin contacto, los defectos que puedan comprometer la integridad estructural de la pastilla analizada, ningún defecto fue encontrado. Del análisis de las imágenes obtenidas, se verifica que la pastilla se deforma como un todo, sin que presente cualquier alteración visible en su patrón de franjas.

Palabras claves: holografía digital, pastillas de metal duro, interferometría holográfica, unwrapping

Abstract

The objective of this work is the application of an interferometric method for validating the result of wear in a cutting tool insert of hard metal. We describe in this paper the experimental setup for the application of Digital Holography technique, used with digital recording of holograms on a CCD camera. The cutting insert inspected with the optical technique was previously mounted on a support structure and slightly heated with a halogen lamp for evidence of defective regions. For image processing, the software

used, ProlTec. It was possible to detect, with high resolution and contactless defects that could compromise the structural integrity of the insert analyzed, no defect was found. Analysis of the images obtained, it is verified that the object is deformed as a whole, not to present any visible alteration in their pattern of fringes.

Key words: digital holography, hard metal chip, holographic interferometry, unwrapping .

Introducción

La holografía digital puede ser utilizada para substituir la forma clásica de registro [1]. A través de la utilización de una matriz CCD (Dispositivo de Carga Acoplada), la holografía digital puede ser considerada una herramienta más simple, rápida y eficiente [2]. En la holografía digital el proceso de reconstrucción completa de la fase de interferencia es realizado mediante computación.

La holografía digital puede ser considerada como una extensión de la holografía convencional y ofrece alta resolución sin que el equipamiento óptico introduzca ninguna complicación en los resultados.

Esta técnica holográfica utiliza una cámara CCD para el registro de un holograma digital y método numérico para la reconstrucción de la imagen [3]. El método proporciona simultáneamente una imagen de amplitud y una imagen de fase.

En la holografía digital, el análisis y síntesis de los frentes de ondas, ocurren a través del procesamiento numérico computacional [4]. En L. P. Yaroslavsky *et al.* [5], son descritos los métodos para la reconstrucción digital de hologramas. Sin embargo, cuando esas técnicas fueron presentadas en 1980, los dispositivos electrónicos de registro, más específicamente el dispositivo de carga acoplada, (CCD), no estaban en un nivel de desarrollo tan avanzado como actualmente [6-8].

La holografía digital permite el análisis de los frentes de ondas que fueron previamente registrados sin necesidad de la reconstrucción física de la imagen pudiendo ser utilizada para comparar dos o más frentes de ondas (interferometría holográfica digital), [9-13]

Considerando las pequeñas dimensiones del objeto y el objetivo del análisis a ser desarrollado, fue seleccionada la técnica de la Holografía Digital para la realización de este trabajo.

En este caso, la Holografía Digital puede ser utilizada como un método rápido, simple y robusto. Substituye medias grabadoras holográficas, por una matriz CCD (*charge-coupled device* - Dispositivo de Carga Acoplada) [6-8]. Todo el proceso de reconstrucción de la fase de interferencia es determinado por computador. La reconstrucción del holograma registrado digitalmente consiste, principalmente, de una transformación de Fourier simples que resulta en una evaluación rápida y flexible.

Mediciones ópticas usando holografía digital generan algunas importantes ventajas:

- Acceso directo a la fase sin evaluación de las franjas de intensidad.
- Tres hologramas son suficientes para la completa determinación de la deformación y del formato.
- Alta sensibilidad y precisión (resolución de desplazamiento típica: algunos nanómetros, resolución de formato típica: hasta algunos micrómetros en un alcance de milímetros).
- Alta resolución de datos (ej. 2048 x 2048 puntos para sub-mm de campo de visión),
- Evaluación computarizada de los datos de la cámara y análisis automática de los resultados y pre-procesamiento de los datos.
- Almacenamiento digital flexible de los hologramas.
- Evaluación automatizada directa de la fase de interferencia.

El objetivo de este trabajo consistió en la aplicación de un método óptico interferométrico para la evaluación del desgaste en una pastilla de metal duro.

Materiales y Métodos

Modelación matemática del proceso holográfico

La descripción fenomenológica de la holografía puede ser expresada por funciones complejas, representativas de los frentes de ondas. Representando el frente de onda del objeto por U_o y el frente de onda de referencia U_R , donde: U_o y U_R definen la amplitud y fase de los respectivos frentes de ondas, el frente de onda resultante puede ser expresado como, [ecuación 1](#):

$$U = U_o + U_R \quad (1)$$

La distribución de intensidad en el filme es obtenida multiplicando U por su conjugado U^* , [ecuaciones 2, 3 y 4](#):

$$I = UU^* \quad (2)$$

$$I = (U_o + U_R)(U_o + U_R)^* \quad (3)$$

$$I = (|U_o|^2 + |U_R|^2) + U_o U_R^* + U_o^* U_R \quad (4)$$

El primer término de la [ecuación 4](#), representa la suma de las intensidades de las frentes de onda de referencia y objeto, mientras que los otros dos términos (que envuelven la multiplicación cruzada de los frentes de ondas con su complejo conjugado) representan el patrón de interferencia requerido.

Iluminado el holograma con el frente de onda de referencia original, se obtiene la siguiente distribución de intensidades, [ecuaciones 5 y 6](#):

$$I_H = U_R I \quad (5)$$

$$I_H = U_R (|U_o|^2 + |U_R|^2) + U_o |U_R|^2 + U_o^* U_R^2 \quad (6)$$

Así, los tres frentes de ondas son reconstruidos. El primer término de la [ecuación 6](#) representa la intensidad combinada de las ondas objeto y la de referencia. El segundo término representa la reconstrucción de la onda objeto original. Existen, básicamente, tres condiciones prácticas que tienen que ser satisfechas para la obtención de hologramas de alta calidad en el laboratorio o en el campo. Esas condiciones son:

- Las frentes de onda objeto y de referencia deben mantener una relación de fase constante (deben ser coherentes).
- El sistema completo debe ser mecánica y térmicamente estable.
- Deben ser usados materiales de registro de alta resolución.

Evaluación de la pastilla utilizando la técnica de la Holografía Digital

En este trabajo se realiza un estudio del desgaste y posibles daños sufridos en una pastilla de corte utilizada para tornearse/fresarse. Esta pastilla fue anteriormente sometida a períodos de maquinado normales y de duración conocidos. Aplicando la técnica de la Holografía Digital se verificó la posibilidad de detectar cualquier tipo de alteración estructural en la pastilla de metal duro.

La pastilla presentaba dos de sus extremos con señales de desgaste. Después de observada al microscopio óptico, ver [figura 1](#), podemos ver en las imágenes que esta presenta en dos extremos algún desgaste y en uno de ellos es visible el arranque de material producto del maquinado.



Fig. 1. Pastilla observada al microscopio (magnificación de 4x)

El esquema experimental mostrado en la [figura 2](#) fue usado para capturar los hologramas para el análisis de desplazamientos. En esta configuración, se utiliza la luz láser coherente (Coherent® Verdi V2, $\lambda = 532 \text{ nm}$, 2 W). El láser es dividido en dos haces por un divisor de haz (*beam splitter*). Uno de ellos, llamado haz objeto, que ilumina el objeto después de haber sido reflejado por un espejo y el otro, llamado haz de referencia, que ilumina a la cámara CCD, después de haber sido reflejado por un espejo y colimado. La cámara CCD de 576×768 pixel, con un tamaño de pixel de $10,8 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, es utilizada en el ensayo para la grabación digital de los hologramas.

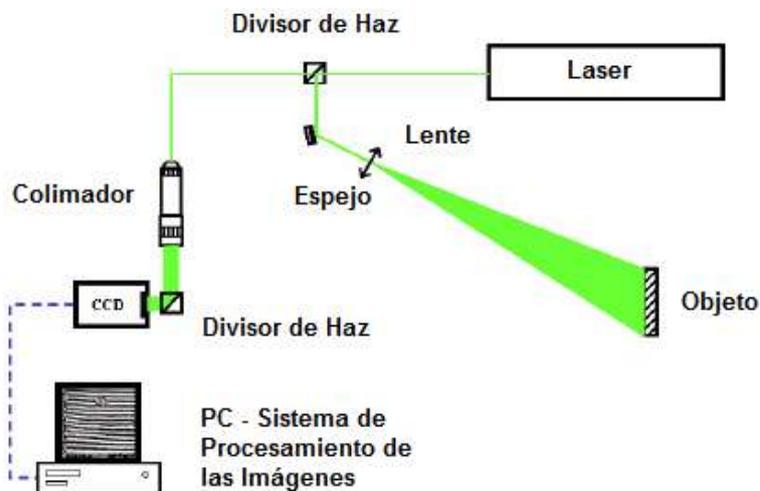


Fig. 2. Esquema utilizado para la aplicación de la Holografía Digital

Debido a la pequeña dimensión del objeto (pastilla) y al análisis pretendido, resultó que la Holografía Digital es la técnica más adecuada. El dispositivo experimental, así como, la pastilla, son presentados en las [figura 3](#) y [figura 4](#).



Fig. 3. Vista del dispositivo experimental utilizado para la implementación de la Holografía Digital



Fig. 4. Posicionamiento de la pastilla en el dispositivo experimental de Holografía Digital

El esquema experimental que sirvió de base para este estudio, está constituido por el láser de Nd:YAG CONTINUUM NY-80, divisor de haz (*beam-splitter*) 90/10, Cámara CCD y la instrumentación restante

necesaria para la realización de las pruebas aquí detalladas. Algunas fotos de esta instrumentación, se muestran en las [figuras 5, 6](#) y [figura 7](#).



Fig. 5. Vista general del dispositivo experimental de Holografía Digital colocado sobre la mesa óptica



Fig. 6. Dispositivo experimental de Holografía Digital, Divisor de Haz (*Beam-splitter* 90/10)



Fig. 7. Dispositivo experimental de Holografía Digital, Cámara CCD

Resultados y Discusión

La pastilla fue ligeramente calentada con el objetivo de excitar posibles defectos estructurales, tales como, grietas. La sollicitación térmica se basa en la existencia de diferentes coeficientes de expansión térmica en zonas de una estructura que contiene desplazamientos, fisuras, delaminaciones, o sea, zonas estructuralmente debilitadas. Los ensayos son realizados a través de un ligero y uniforme calentamiento de la superficie del objeto. En general, los materiales más espesos y con mayor conductividad térmica necesitan de una carga térmica más importante. La estimulación térmica funciona especialmente bien en estructuras de CFRP (*Carbon-fiber-reinforced polymer*), en la detección de desplazamientos, delaminaciones u otros defectos de impacto, pues el carbono muestra un gran coeficiente de expansión térmica. Durante la estimulación, la superficie se calienta más rápido que el interior. La estructura íntegra, evita que localmente existan alargamientos de la superficie. Sin embargo, si existe un defecto, la zona defectuosa es libre de deformarse y este hecho es observado a través del interferograma obtenido. Este es sin dudas, el método más popular de solicitar una estructura. La facilidad de utilización, viene de la facilidad en utilizar los medios de estimulación, los cuales pueden ser; una simple lámpara de halógeno, un calentador de aire, así como también, un sistema de calentamiento comandado por computador.

Se debe agregar, que aun teniendo la técnica en análisis, elevada resolución, no fueron observadas alteraciones en los patrones de franjas correspondientes a ese tipo de defectos.

La baja conductividad del material, obligó a utilizar calentamientos más elevados del que normalmente se utiliza (2 a 3 °C), debido a que las pastillas son hechas de materiales con baja expansión térmica.

La pastilla inspeccionada con la técnica óptica fue previamente montada en una estructura de soporte, ([Ver Fig. 4](#)) y ligeramente calentada con una lámpara de halógeno para evidenciar las regiones con defecto.

En el ensayo de la pastilla, implementando el sistema de Holografía Digital y utilizando en el procesamiento de las imágenes el software, ProITec, fueron obtenidos los siguientes resultados:

En la [figura 8](#), se presenta la imagen que representa el mapa de fase, en este interferograma de fase, las franjas indican el local de la superficie del objeto y las franjas centrales discontinuas muestran el local del orificio del objeto. Este interferograma fue realizado consiguiendo la interferencia entre dos hologramas tomados antes del calentamiento y después del calentamiento de la pastilla.

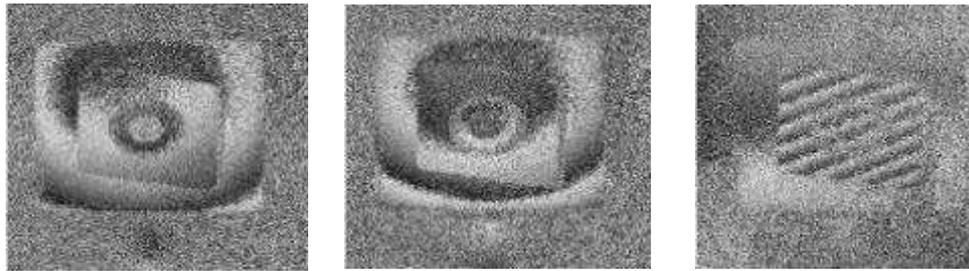


Fig. 8. Mapa de fase

En la [figura 9](#), se presenta el mapa de fase filtrado. Con o auxilio de un filtro seno-coseno, se consigue aumentar la resolución de las franjas, ajustando la imagen para la realización del desenrollado. Esta [figura 9](#), muestra el interferograma de fase con un filtro seno-coseno de matriz 7x7.

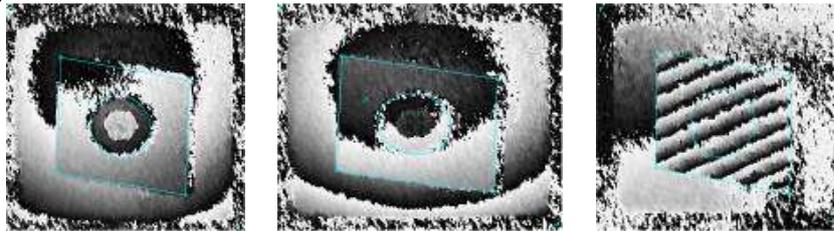


Fig. 9. Mapa de fase filtrado

En la [figura 10](#), es presentada la imagen del desenrollado de la fase (*Unwrapping*) [14]. Para obtener el perfil del objeto estudiado, el mapa de fase pasa por un proceso de desenrollado de la fase (*Unwrapping*). Utilizando el software Protec se desenrolla el mapa de fase y la imagen resultante presenta la distribución de fases del objeto.

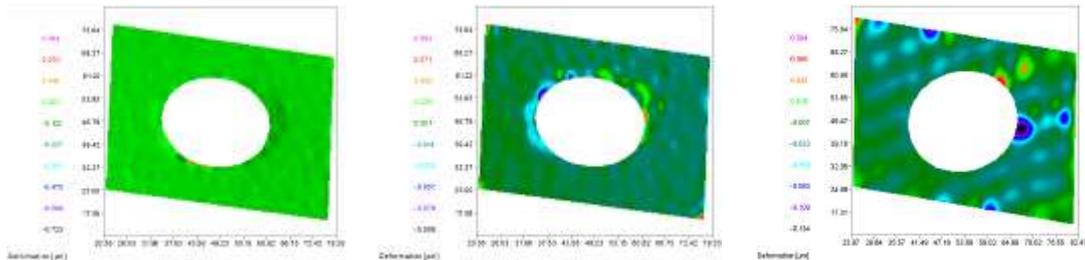


Fig. 10. Imagen del desenrollado de la fase (*Unwrapping*)

A partir de la figura de enrollado (*unwrapping*), utilizando el software Protec, convertimos los tonos de gris en distribución de elevación, [figura 11](#) y [figura 12](#), obteniendo de esta forma, una imagen de reconstrucción que presenta la derivación horizontal y derivación vertical respectivamente. Se verifica para este análisis, que no existen distorsiones en la pastilla de metal duro analizada.

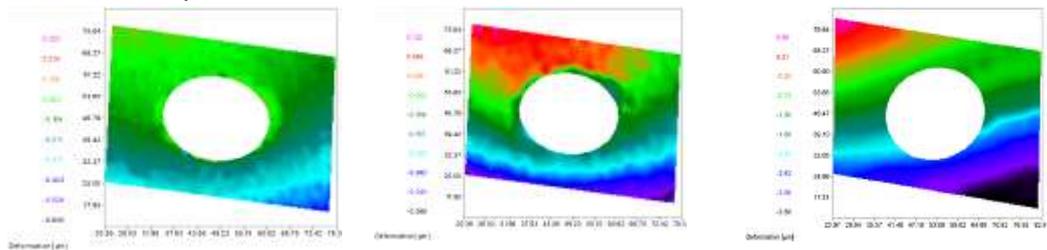


Fig. 11. Imagen de reconstrucción que presenta la derivación horizontal

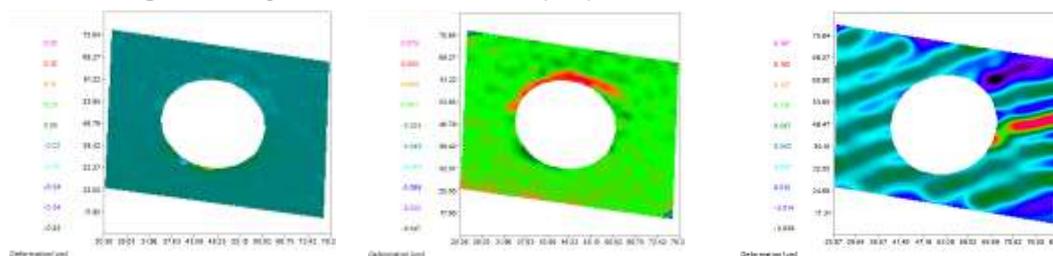


Fig. 12. Imagen de reconstrucción que presenta la derivación vertical

A partir del análisis de los campos de desplazamientos, se verifica que la pieza se deforma como un todo, no siendo evidente cualquier alteración visible en el campo que indique algún defecto estructural en la pastilla de metal duro, específicamente en las zonas identificadas con fallas. Las derivadas espaciales del campo de

desplazamiento, permiten amplificar las discontinuidades o perturbaciones en el campo de desplazamientos, tornando más evidente la presencia de defectos. Así, y para el caso en análisis, se puede afirmar que nos encontramos en presencia de una pastilla de metal duro con algún desgaste superficial, pero que no presenta fallas en su estructura, las cuales pudiesen ser observadas en la superficie.

Se verificó que la aplicación de la Holografía Digital puede tener un impacto positivo en la inspección de pastillas de metal duro, tal como aquí fue demostrado.

Las técnicas ópticas, son herramientas confiables y se demostró que pueden ser bien adaptadas para realizar inspección estructural.

Este trabajo, confirma la relevancia de la aplicación de la técnica de Interferometría holográfica como ensayo no destructivo, para el cual, esta técnica, ha encontrado gran aplicación, esencialmente debido a su elevada resolución y al hecho de ser una técnica de campo y sin contacto.

Conclusiones

Con esta técnica, fue posible detectar, con alta resolución y sin contacto, los defectos que puedan comprometer la integridad estructural de la pastilla de metal duro analizada, para este caso particular, ningún defecto fue encontrado.

Del análisis de las imágenes obtenidas, se verifica, que la pastilla de metal duro se deforma como un todo, sin que presente cualquier alteración visible en su patrón de franjas.

No fue, por eso, detectado cualquier defecto estructural en la pastilla de metal duro. En este caso, se puede afirmar que estamos en presencia de una pastilla que, a pesar de presentar algún desgaste superficial y aun habiendo existido en uno de sus extremos arranque de material, no presenta aun cualquier falla detectable en su estructura.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración del LOME-INEGI (Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental) de Porto, Portugal. Agradecen también el soporte financiero para el desarrollo de estas investigaciones suministrado por el CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) de Brasil. Agradecimiento para la USP São Carlos (Universidade de São Paulo, Depto. de Engenharia de Produção, Núcleo de Manufatura Avançada), al Departamento de Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da USP y de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinarias de la Facultad de Ingeniería Mecánica, La Habana, Cuba.

Referencias

1. Valin JL, Gonçalves E, Palacios F, et al. Methodology for analysis of displacement using digital holography. *Optical Engineering*. 2005;43(1):99-115.
2. Valin JL, Palacios F, Gonçalves E, et al. Application of digital holography in the calculation of displacements. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*. 2004;5622:1334-40.
3. Valín Rivera JL, Monteiro JM, Lopes HM, et al. Proposal for underwater structural analysis using the techniques of ESPI and digital holography *Optics and Lasers in Engineering*. 2009;47:1139-44.
4. Prakash R, Zachariah C. A, Anith N. Compressive Fresnel digital holography using Fresnelet based sparse representation. *Optics Communications*. 2015;340:110-5.
5. Yaroslavsky LP, Merzlyakov NS. *Methods of Digital Holography*. New York, USA: Consultant Bureau; 1980. DOI [Citado]
6. Palacios F, Palacios D, Gonçalves E, et al. 3D Nuclear Track Analysis By Digital Holographic Microscopy Radiation Measurements. 2011;46:98-103.
7. Pérez JOR, Muramatsu M, Palacios F, et al. Potentialities of the digital holography in the study of the Fraunhofer diffraction pattern of microscopic objects. *Journal of Physics Conference Series*. 2011;274:1-9.
8. Palacios F, Valin JL, Pérez JOR, et al. 3D image reconstruction of transparent microscopic objects using digital holography. *Optics Communications*. 2005;248(1-3):41-50.
9. Schnars U. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms. *J Opt Soc Am A*. 1994;11:98-108.
10. Pedrini G, Zou YL, Tiziani HJ. Digital double pulse-holographic interferometry for vibration analysis. *J Mod Opt*. 1995;42:367-74.
11. Pedrini G, Tiziani HJ, Zou YL. Digital double pulse-TV-holography. *Opt Laser Eng*. 1997;26:199-219.
12. Pedrini G, Froening P, Fessler H, et al. In-line digital-holographic interferometry. *Appl Opt* 1998;37(26):6262-9.
13. Gren P, Schedin S, Li X. Tomographic reconstruction of transient acoustic fields recorded by pulsed TV holography. *Appl Opt*. 1998;37(5):834-40.
14. Palacios F, Palacios D, Valin JL, et al. Methods of Fourier optics in digital holographic microscopy. *Optics Communications*. 2008;281:550-8.