

## UTILIZACIÓN DE LA INTERFEROMETRÍA SPECKLE EN LA DETECCIÓN PRECOZ DE FALLOS POR FATIGA EN ACEROS DE ALTA RESISTENCIA

R. Rodríguez-Martín<sup>1</sup>, I. Castro<sup>1</sup>, I. Ocaña<sup>1</sup>, J.M. Martínez-Esnaola<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Materiales, CEIT y Tecnum (Universidad de Navarra),  
Paseo de Manuel Lardizábal, 15,  
20018 San Sebastián. España  
E-mail: rarodriguez@ceit.es

### RESUMEN

Se ha estudiado el comportamiento a fatiga de aceros de alta resistencia de última generación ( $\sigma_{UTS}= 950-1000$  MPa). Específicamente, el estudio se ha centrado en la etapa de iniciación de las microgrietas de fatiga. Con este objetivo, se han realizado ensayos de fatiga uniaxial de alto número de ciclos. Durante estos ensayos se ha seguido la historia de deformación de la probeta usando interferometría speckle. Esta técnica permite monitorizar la evolución de los campos de desplazamientos de la superficie de la probeta y, en consecuencia, puede ser utilizada como herramienta de detección de grietas en los primeros estadios. La consecuente observación mediante microscopía electrónica de barrido de la superficie de fractura de las probetas ensayadas proporciona información complementaria sobre la ubicación de la iniciación del fallo y permite establecer una correlación de las observaciones realizadas mediante interferometría con las localizaciones reales de los inicios de fatiga y con la evolución de la grieta durante su propagación. Los resultados muestran que la interferometría Speckle es una técnica prometedora para la detección precoz de fallos a fatiga, tanto en probeta como en estructura real.

### ABSTRACT

The fatigue behaviour of next generation high strength steels ( $\sigma_{UTS}= 950-1000$  MPa) has been studied. Specifically, this study is focused on the initiation stage of fatigue microcracks. With this purpose, high cycle fatigue tests under uniaxial loading have been performed. During these tests, the deformation history of the specimen has been tracked by means of speckle interferometry. This technique allows monitoring the evolution of the displacement field of the specimen surface, so that it can be used as a tool for detecting microcracks in the first stages. The subsequent observation of the fracture surfaces of the tested specimens by scanning electron microscopy provides complementary information about the localization of the initiation of failure, allowing establishing a correlation between the observations made by interferometry and the actual location of the fatigue nucleus and the evolution of the crack during its propagation. The results show that the speckle interferometry is a promising technique for the early detection of fatigue failures in both, specimens and real structures.

**PALABRAS CLAVE:** Acero C70E, Acero 25CrMo4E, Fatiga, Interferometría Speckle.

### 1. INTRODUCCIÓN

La fractura por fatiga es en la actualidad una de las principales causas de fallo en servicio de estructuras y componentes fabricados en aceros de alta resistencia [1]. Especialmente relevante es la primera etapa del proceso de fatiga, que implica la formación de la microgrieta y su crecimiento lento, puesto que consume prácticamente la totalidad de la vida a fatiga de la pieza.

La formación de microgrietas de fatiga en metales dúctiles se asocia frecuentemente a su superficie libre [2, 3]. En este trabajo se presenta la puesta a punto de un dispositivo de interferometría speckle como método de localización prematura de la zona exacta de iniciación de la microgrieta.

La interferometría speckle es una herramienta dentro de la metrología óptica que permite obtener medidas de

desplazamientos y deformaciones en la superficie de un objeto con elevada precisión [4, 5]. Esta técnica, comparada con los métodos convencionales, posibilita la medición de los desplazamientos en varios puntos simultáneamente sin que exista contacto directo con el objeto.

Sobre el objeto se hace incidir una fuente de luz de elevada coherencia (láser). La interferencia entre el haz que contiene información de la superficie del objeto y un haz de referencia origina un patrón de speckle que se resuelve en una cámara de televisión. Por sustracción de los patrones de speckle correspondientes a dos estadios diferentes del objeto (p. ej. sin y bajo la acción de una determinada carga) se obtienen las franjas de correlación. La interpretación cuantitativa de dichas franjas permite evaluar el cambio producido en el campo de desplazamientos de la superficie del objeto entre los estadios inicial y final [5, 6]. Dicho cambio se

asocia en este estudio a la aparición del daño y la consecuente iniciación de la microgrieta que desencadena el fallo del objeto por fatiga.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE

La Figura 1 muestra el sistema típico empleado en la realización de medidas de interferometría speckle. El haz del láser se divide en un haz de referencia y un haz objeto por medio de un divisor de haz que permite controlar la relación referencia – objeto. La imagen procedente del objeto tras la actuación del haz objeto y el haz de referencia se recoge en una cámara CCD. Dicha cámara captura un patrón de speckle, consecuencia de la interferencia de los frentes de onda provenientes de ambos haces.

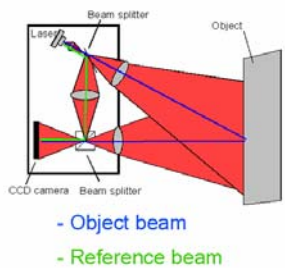


Figura 1. Sistema utilizado en la interferometría speckle.

Cuando se deforma el objeto el frente de onda que emana de él se altera ligeramente, mientras que el frente de onda procedente del haz de referencia permanece intacto (Figura 2). De este modo, se registra un nuevo patrón de speckle en la cámara CCD. La resta de los patrones de speckle registrados antes y después de la deformación proporciona las denominadas franjas de correlación, según se ilustra en la Figura 3. La sustracción se realiza en un ordenador y por este motivo, la técnica se conoce como interferometría electrónica de patrones de speckle (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI).

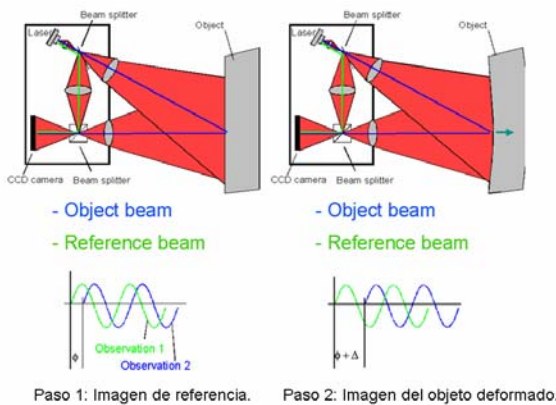


Figura 2. Salto de fase producido entre los haces objeto y referencia como consecuencia de la deformación introducida en el objeto.

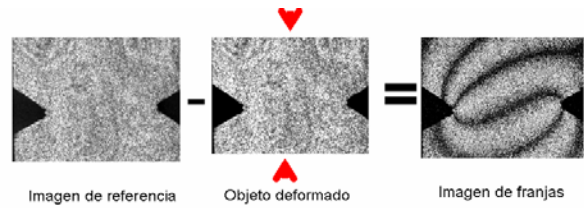


Figura 3. Franjas de correlación obtenidas como resultado de la sustracción de los patrones de speckle correspondientes a dos estadios diferentes del objeto.

Mediante el uso de complejos algoritmos computacionales, las franjas de correlación derivan en los mapas de fase, a partir de los cuales es posible medir el campo de desplazamientos con elevada precisión [5, 7]. En la Figura 4 se esquematiza el procedimiento.

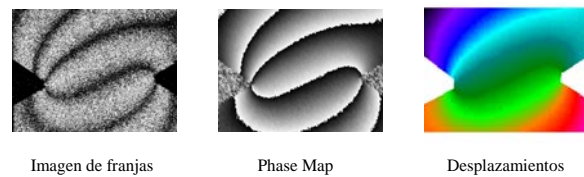


Figura 4. Evolución de las franjas de correlación en el proceso de obtención del campo de desplazamientos.

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Materiales

Se han utilizado dos aceros de alta resistencia con aplicación en el sector de automoción. Concretamente, se han analizado las calidades C70E (acero ferrito-perlítico) y 25CrMo4E (acero martensítico, obtenido mediante temple y revenido), que se emplean en la fabricación de bielas y cigüeñales.

En la Tabla 1 se presenta la composición química de ambos aceros. En la Tabla 2 se resumen sus propiedades mecánicas principales.

Tabla 1. Composición química de los aceros estudiados.

% peso	C70E	25CrMo4E
<b>C</b>	0.70	0.26
<b>Si</b>	0.27	0.34
<b>Mn</b>	1.00	0.82
<b>P</b>	0.013	0.017
<b>S</b>	0.018	0.027
<b>Cr</b>	0.19	1.06
<b>Mo</b>	0.045	0.22
<b>Ni</b>	0.13	0.16
<b>Al</b>	0.010	0.023
<b>Cu</b>	0.15	0.20
<b>Ti</b>	0.003	0.005

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros C70E y 25CrMo4E.

	C70E	25CrMo4E
$\sigma_{UTS}$ (MPa)	990	943
$\sigma_Y$ (MPa)	570	840
Elongación (%)	10.2	16
Reducción en área (%)	19	62.8

3.2 Ensayos de fatiga uniaxial de alto número de ciclos con interferometría speckle

Los ensayos de fatiga uniaxial se han realizado en una máquina de ensayos dinámicos RUMUL modelo MIKROTON. La geometría de las probetas utilizadas se muestra en la Figura 5.

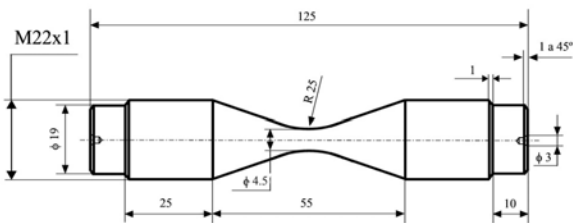


Figura 5. Probeta utilizada en los ensayos de fatiga. Geometría tipo reloj de arena.

Los ensayos se han llevado a cabo siguiendo la norma ASTM E466 [8]. En todos ellos se ha impuesto una relación simétrica de cargas ( $R = -1$ ). La frecuencia media obtenida ha sido de 152 Hz.

Para las medidas de interferometría speckle se ha utilizado un equipo Q-300 de la casa comercial DANTEC DYNAMICS [9]. Dicho equipo se ha situado próximo a la máquina de fatiga en un soporte rígido para evitar vibraciones. El montaje experimental se muestra en la Figura 6. Según se percibe en la figura, la probeta se ha recubierto con una fina capa de polvo con el objetivo de mejorar su emisividad.

El procedimiento seguido en la obtención del campo de desplazamientos con interferometría speckle es el siguiente:

- 1- Se elige la zona de interés, en la cual el software evaluará el campo de desplazamientos. En este caso el cuello de la probeta (Figura 7), puesto que en él se alcanzan las tensiones máximas.
- 2- Se inicia el ensayo, que se detiene tras un número determinado de ciclos. Se descarga la probeta y se toma la imagen de referencia. Seguidamente, la probeta se carga hasta la tensión máxima alcanzada

durante el ensayo y se registra la imagen. Mediante la sustracción de ambas imágenes el software proporciona el campo de desplazamientos en la zona de interés.

- 3- Se repite el paso 2 cada cierto número de ciclos. La última medida (instante previo a la rotura de la probeta) se toma tras detener el ensayo cuando se produce una caída en el valor de la frecuencia de 0.2 Hz. En todos los ensayos realizados en este estudio se ha comprobado que una vez que la frecuencia disminuye 0.2 Hz la vida a fatiga de las probetas es de tan solo unos pocos ciclos más.

Cuando se procede a través de los pasos 1 a 3 el software registra la evolución del campo de desplazamientos durante el ensayo de fatiga. Mediante el análisis de los resultados se ha podido detectar el punto de inicio del fallo, según se relata en el siguiente apartado.



Figura 6. Montaje experimental para las medidas de interferometría speckle.

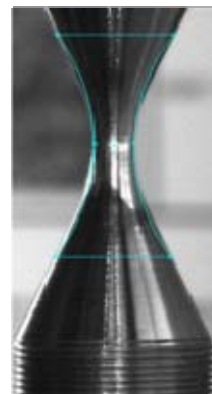


Figura 7. Área de interés en las medidas de interferometría speckle.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 resume los valores de los parámetros relacionados con los ensayos de fatiga uniaxial.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de fatiga uniaxial bajo amplitud constante con  $R = -1$ .

	Probet a	Diámetro (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	Ciclos a rotura
C70E	1	4.455	440	529300
	2	4.450	440	169700
25CrMo4E	1	4.455	480	300500
	2	4.470	480	253200
	3	4.420	480	324300
	4	4.395	480	480900

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de las franjas de correlación obtenidas, que reflejan la deformación producida en la superficie del objeto entre los estadios inicial (probeta descargada) y final (probeta cargada hasta la tensión máxima del ensayo) para un determinado número de ciclos.

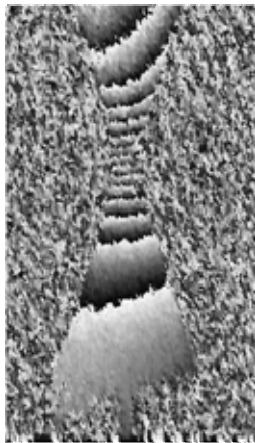


Figura 8. Franjas de correlación obtenidas en una probeta del acero C70E.

Como se ha mencionado con anterioridad, a partir de las franjas de correlación es posible calcular el campo de desplazamientos en la zona de interés. En la Figura 9 se ilustran los resultados obtenidos en una probeta del acero C70E rota a 169700 ciclos. Antes de comenzar el ensayo ( $N = 0$ ), la distribución de desplazamientos es simétrica. Además, y aunque no se presenta por falta de espacio, se ha comprobado que la consiguiente deformación coincide con el valor de deformación elástica correspondiente al nivel de carga impuesto sobre la probeta. A medida que va aumentando el número de ciclos se observa que el campo de desplazamientos se altera. Así, cuando prácticamente se alcanza la vida a fatiga de la probeta ( $N = 167000$ ) se produce una clara discontinuidad local en la región central. Concretamente, en la zona señalada con una flecha negra, los desplazamientos son positivos y, sin embargo, deberían ser negativos, puesto que se

encuentran por debajo del centro de la probeta. Esta circunstancia indica la presencia de una grieta incipiente en esa área, lo que explica, además, el hecho de que la probeta se encuentre descargada en la parte derecha de su zona central (valor de los desplazamientos cercano a 0).

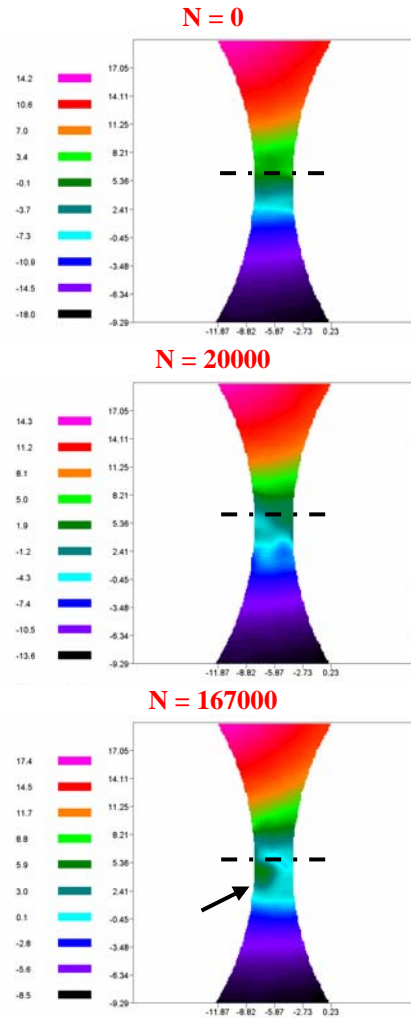


Figura 9. Evolución del campo de desplazamientos en dirección vertical durante un ensayo de fatiga uniaxial en una probeta del acero C70E.

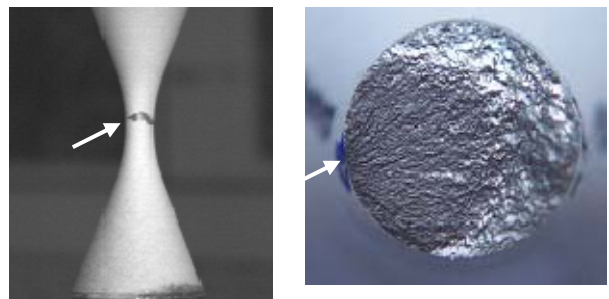


Figura 10. Probeta del acero C70E rota y consecuente superficie de fractura. Las flechas indican la localización del núcleo de fatiga.

La observación fractográfica de la probeta rota (Figura 10) sustenta los resultados obtenidos mediante interferometría speckle. El inicio del fallo por fatiga se ha localizado, precisamente, en la parte izquierda de la región central de la probeta.

La Figura 11 muestra los resultados obtenidos con interferometría speckle durante la realización de un ensayo de fatiga uniaxial sobre una probeta del acero 25CrMo4E.

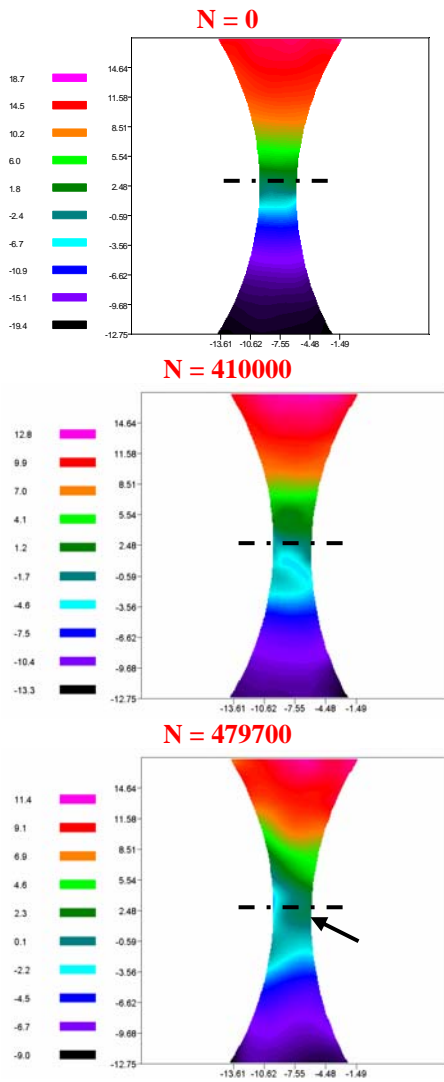


Figura 11. Evolución del campo de desplazamientos en dirección vertical durante un ensayo de fatiga uniaxial en una probeta del acero 25CrMo4E.

En esta probeta, que ha resistido un mayor número de ciclos ( $N = 480900$ ), se comprueba el mismo fenómeno y nuevamente, a medida que avanza el ensayo se desarrolla una irregularidad en el campo de desplazamientos de la región central. Así, la zona señalada con la flecha negra alcanza mayores valores de desplazamiento, particularidad que, unida al hecho de que en dicha zona los puntos situados por debajo de la

región central adquieren un valor positivo de desplazamiento, indica que la grieta se inicia en algún punto del entorno. La Figura 12 muestra el análisis fractográfico de la probeta rota. El núcleo de fatiga se encuentra en la parte derecha de la probeta, tal y como se deduce de la interpretación de los resultados de interferometría speckle.

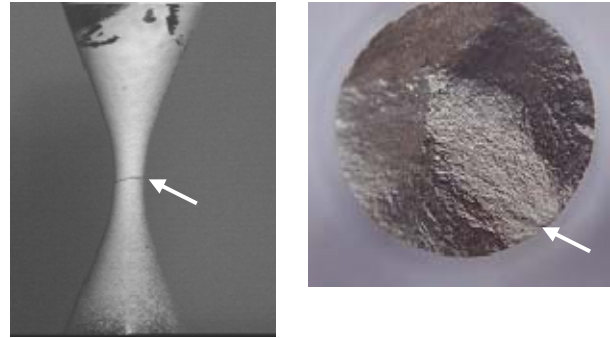


Figura 12. Probeta rota del acero 25CrMo4E y consecuente superficie de fractura. Las flechas indican la localización del núcleo de fatiga.

En la Figura 13 se presenta un último ejemplo de la aplicación de la interferometría speckle en la detección prematura de microgrietas de fatiga. En este caso se analiza una probeta del acero 25CrMo4E rota tras la acción de 324300 ciclos.

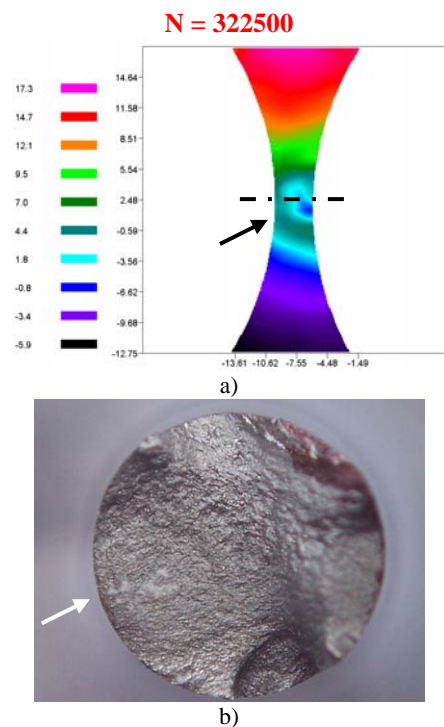


Figura 13. a) Campo de desplazamientos previo a rotura en una probeta del acero 25CrMo4E. b) Localización del núcleo de fatiga sobre la superficie de fractura.

Siguiendo el mismo argumento que en los dos ejemplos anteriores, el campo de desplazamientos señala la presencia de una grieta naciente en el lugar indicado por la flecha negra, que coincide de nuevo con las observaciones fractográficas (flecha blanca en la Figura 13b).

## 5. CONCLUSIONES

La técnica de interferometría speckle permite visualizar, en tiempo real, la evolución del campo de desplazamientos sobre la superficie de una probeta durante la realización de un ensayo de fatiga. A partir de estos datos, se ha conseguido seguir la etapa de formación de la microgrieta de fatiga y determinar su localización exacta. En consecuencia, en este trabajo se presenta la interferometría speckle como una técnica prometedora para la detección prematura de los fallos por fatiga.

## AGRADECIMIENTOS

El contenido de este artículo es consecuencia de un proyecto de investigación subvencionado por C.E.C.A. (RFSR-CT-2005-00034) en cooperación con CSM, e Iveco (Italia), Ascometal (Francia) y Sidenor (España). Así mismo, uno de los autores (R.R.M.) desea expresar su agradecimiento al programa Torres Quevedo del Ministerio de Educación y Ciencia y cofinanciado por el Fondo Social Europeo por la ayuda económica que le ha sido concedida.

## REFERENCIAS

- [1] Schijve, J., "Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art", *International Journal of Fatigue*, vol. 25, nº 8, 2003, p. 679.
- [2] Buch, A., "Fatigue Strength Calculation ", Trans Tech Publications, Switzerland, 1988, 467 pages, ISBN: 0-87849-537-1.
- [3] Frost, N.E. *et al.*, "Metal Fatigue", Dover Publications, Mineola, New York, 1999, 499 pages, ISBN: 0-486-40927-9.
- [4] Arizaga, R. *et al.*, "Simultaneous multiple-viewpoint processing in digital speckle pattern interferometry", *Applied Optics*, vol. 33, nº 20, 1994, p. 4369.
- [5] Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry: A Discussion of the Theory, Practice and Application of the Techniques", Cambridge University Press, London, 1989, 353 pages, ISBN: 0-521-34417-4.
- [6] Dainty, J.C., "Laser Speckle and Related Phenomena", Springer-Verlag, Berlin, 1975, 286 pages, ISBN: 3-540-07498-8.
- [7] Yang, L.X. *et al.*, "Precision measurement and nondestructive testing by means of digital phase

shifting speckle pattern and speckle pattern shearing interferometry", *Measurement*, vol. 16, nº 3, 1995, p. 149.

- [8] "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials". *ASTM E466*.
- [9] <http://www.dantec.co.uk/>. [Consulta: 1 de febrero de 2008].