

EXPERIMENTAL RESULTS IN FRETTING FATIGUE WITH SHOT AND LASER PEENED SPECIMENS

J. Vázquez, C. Navarro, J. Domínguez

Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales,
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España.
Tel. +34 954481365
E-mail: jesusvaleo@esi.us.es

RESUMEN

El objetivo de este artículo es mostrar de los tratamientos de shot y laser peening en la fatiga por fretting de un aluminio Al 7075-T651. Estos tratamientos introducen un campo de tensiones residuales de compresión en las cercanías de la superficie, zona donde aparecen altas tensiones como consecuencia del contacto. Para ello, se han realizado una serie de ensayos de fatiga por fretting sobre probetas a las cuales se les han aplicado estos tratamientos. Para completar este estudio, se han medido en cada uno de los diferentes tratamientos, el campo de tensiones residuales, la relajación de las tensiones residuales por la acción de las cargas cíclicas, el coeficiente de fricción, la rugosidad superficial y la dureza del material.

ABSTRACT

The objective of this paper is to experimentally measure the effect of laser and shot peening on fretting fatigue life in the aluminium alloy 7075-T651. These surface treatments should have a highly beneficial effect on life since they introduce a field of compressive residual stresses close to the surface of the peened specimens, where the high contact stress concentrations appear. In order to achieve this goal, some specimens previously treated with shot and laser peening were tested under fretting fatigue conditions. To complete this study, the residual stress fields, residual stress relaxation caused by cyclic loading, roughness, friction coefficient and hardness was measured in every test specimen.

KEY WORDS: Fretting fatigue tests, residual stresses, stress relaxation, shot peening, laser peening.

1. INTRODUCTION

La fatiga por fretting es un fenómeno que se produce en muchos componentes en servicio tales como uniones remachadas y atornilladas, uniones eje-cubo, cables metálicos, etc. [6]. Este tipo de fallo aparece en sistemas mecánicos donde las cargas de servicio causan movimientos cíclicos relativos de muy pequeña amplitud entre componentes que se encuentran presionados entre sí. Debido a las fuerzas de fricción, estos desplazamientos desarrollan unas tensiones cíclicas en las zonas en contacto las cuales dan lugar a la formación de grietas. Estas grietas, y por efecto de la tensión global presente en el sistema, pueden propagarse hasta que se produzca el fallo componte.

Para reducir el efecto negativo de este fenómeno, se han empleado diferentes estrategias: shot peening, laser peening, recubrimientos superficiales para reducir el coeficiente de rozamiento, tratamientos termoquímicos para mejorar las propiedades tribológicas de las superficies, uso de lubricantes, mejoras en el diseño, etc. [2]. De entre todos estos, cabe destacar los tratamientos de shot y laser peening, cuya principal característica es la de introducir un campo de tensiones residuales de compresión, que mejora en gran medida la resistencia a la fatiga por fretting de los componentes [3].

Con objeto de cuantificar el beneficio que producen los tratamientos de shot y laser peening en la fatiga por fretting, se han realizado una serie de ensayos con diferentes tratamientos y niveles de carga. Además, para entender el comportamiento frente a la fatiga por fretting observado en los ensayos realizados, se han analizado diferentes aspectos de cada uno de los tratamientos empleados, tales como: campo de tensiones residuales, rugosidad superficial, cambios en la dureza del material, coeficiente de rozamiento y relajación de las tensiones residuales.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

El útil de ensayos utilizado se muestra de forma esquemática en la Figura 1. Este conjunto se ha diseñado y construido para que funcione en conjunto con un equipo servohidráulico de ensayos uniaxiales. Este tipo de útil, el cual es muy similar al descrito por Wittkowsky *et al.* [4], ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales de la Universidad de Sevilla [5].

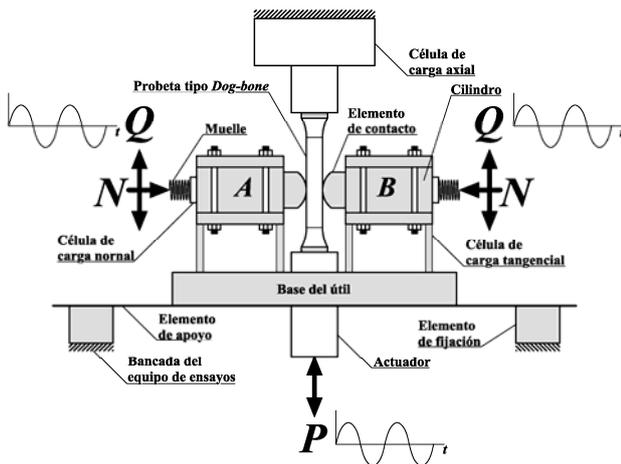


Figura 1. Esquema del útil de ensayos utilizado

Se ha utilizado un contacto esfera-plano, ya que desde el punto de vista experimental, tiene la ventaja de no presentar problemas de alineamiento y permite localizar más fácilmente el punto de iniciación de grieta. El tipo de probetas que se ha utilizado en la totalidad de los ensayos es de las llamadas *dog-bone*. En la Figura 2 y 3 se muestran los elementos de contacto y el tipo de probetas utilizadas respectivamente, donde todas las dimensiones están acotadas en milímetros.

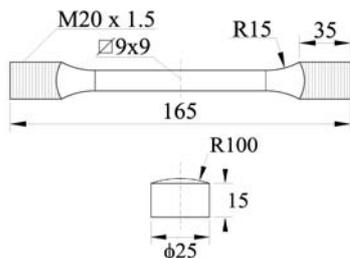


Figura 2. Probetas y elemento de contacto utilizados en los ensayos

3. MATERIAL Y TRATAMIENTOS

Tanto las probetas como los elementos de contacto han sido fabricados a partir de una barra de 25 mm de Al 7075-T651 fabricada por ALCOA. Las propiedades mecánicas de tracción del Al 7075-T651 han sido obtenida mediante una serie de ensayos, que se han realizado siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM E8M-04 [6]. La velocidad de crecimiento de grieta se ha obtenido mediante la norma ASTM E647-05. En la Tabla 1 se resumen las propiedades mecánicas obtenidas según la norma anterior, excepto el coeficiente de Poisson, los parámetros de la curva ϵ - N y las constantes de Ramberg-Osgood para la curva de tensión-deformación cíclica, los cuales han sido tomados de la bibliografía [7].

Tabla 1. Propiedades mecánicas Al 7075-T651

Propiedades estáticas		
Módulo de Young	E	71 GPa
Coef. Poisson	ν	0.33
Límite elástico	σ_y	503 MPa
Límite de rotura	σ_u	572 MPa

Propiedades cíclicas		
Límite elástico cíclico	σ_y'	541 MPa
Coef. endurecimiento	K'	694 MPa
Exp. endurec.	n'	0.04
Coef. resistencia a fatiga	σ_f'	1231 MPa
Coef. ductilidad a fatiga	ϵ_f'	0.263
Exp. resistencia a fatiga	b	-0.122
Exp. ductilidad a fatiga	c	-0.806
Propiedades de crecimiento R=0		
Coeficiente	C	$4.83 \cdot 10^{-11}$
Exponente	n	3.517

En lo que se refiere a los tratamientos empleados en los ensayos, se han utilizado dos tipos de shot peening y dos tipos de laser peening.

El primer tipo de shot peening (shot peening tipo A o SP A) utilizado en los ensayos tiene la designación, según la norma AMS-S-2430, de *BA600N/F20-24A/100% Peenscan*. Este shot peening consiste en sólo bombardeo con bolas de acero, y una intensidad media, y por ello se considera un tratamiento de shot peening típico, por lo que es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica. El segundo tipo de shot peening utilizado (shot peening tipo B o SP B) tiene la designación, según la norma anterior, *BA800N/F25-35%/100%+Glass bead peening*. En este caso el tratamiento consiste en un doble shot peening, el primero es similar al realizado con el tipo A, pero posteriormente se aplica otro con bolas de vidrio, lo que mejora la rugosidad superficial, incrementa las tensiones de compresión introducidas y limpia la superficie bombardeada de posibles restos féreos depositados en el primer shot peening aplicado.

En cuanto a los ensayos realizados con probetas tratadas con laser peening, en el primer tipo la intensidad del haz de rayos láser que incide sobre la superficie del material es de $1\text{GW}/\text{cm}^2$. Esta intensidad, se consigue incidiendo sobre un área de $4.72\text{cm} \times 4.72\text{cm}$ un pulso con una energía de 4J durante un tiempo de exposición de 8ns. Este proceso de exposición se realiza dos veces sobre todas las zonas tratadas. Para proteger la superficie en cada una de las exposiciones, se ha colocado en la superficie de aplicación un recubrimiento adhesivo metálico, que se retira una vez terminado el proceso. En el segundo tipo de laser peening utilizado, la intensidad del haz de rayos láser que incide en el material en este caso es de $2\text{GW}/\text{cm}^2$. En este caso el proceso se realiza exponiendo una zona de $5.55\text{cm} \times 5.55\text{cm}$ a un pulso de 11J durante 18ns, y al igual que en el caso anterior, también se realiza dos exposiciones sobre las zonas tratadas. De forma similar, en este tratamiento también se ha colocado un recubrimiento protector.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Tensiones residuales

Para entender el comportamiento de las probetas tratadas en condiciones de fretting, se ha medido las

tensiones residuales de cada uno de los tratamientos mediante la técnica del agujero ciego [8]. El método empleado para obtener la distribución de tensiones residuales a partir de la evolución de las deformaciones con la profundidad del taladro ha sido el método integral [9],[10]. Las distribuciones de tensiones residuales mostradas en las siguientes secciones, se han obtenido realizando la media de dos diferentes medidas. La figura 3 muestra las distribuciones de tensiones residuales, en la dirección longitudinal de las probetas, obtenidas en cada uno de los tratamientos. En esta figura se observa las principales diferencias entre los tratamientos de shot y laser peening. En primer lugar, cabe destacar cómo ambos tratamientos de laser peening producen un campo de tensiones residuales con valores significativos hasta una profundidad de 1mm aproximadamente. Mientras tanto, los dos tratamientos analizados de shot peening alcanzan valores mayores de las tensiones, respecto a las obtenidas para el laser peening, pero en este caso la zona con valores importantes se encuentra entre las 50 y las 400 μm .

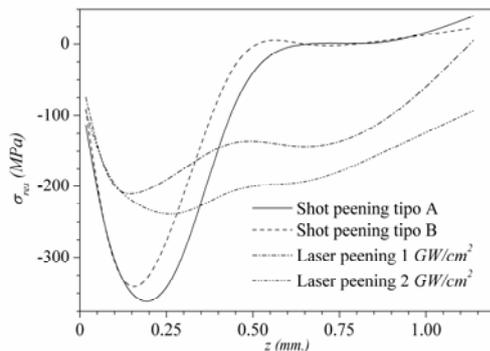


Figura 3. Tensiones residuales de los diferentes tratamientos en la dirección longitudinal

4.1 Rugosidad superficial y coeficiente de rozamiento

En el caso de la fatiga por fretting, es conocido el efecto beneficioso que se produce al incrementar la rugosidad de las superficies en contacto [11]. Este incremento de la rugosidad, es similar al alivio de tensiones a causa de una ranura, lo que puede provocar un aumento o incluso desaparición de la fase de iniciación [11]. Otro parámetro importante en la fatiga por fretting es el coeficiente de rozamiento μ entre las superficies en contacto [12]. La tabla 2 muestra los valores medios de las rugosidades superficiales y del coeficiente de rozamiento obtenidos para cada uno de los tratamientos empleados, así como de las probetas sin tratar.

Tabla 2. Coeficiente de rozamiento y rugosidad superficial

	μ	Rug. sup. (μm)		
		R_a	R_z	R_t
Sin tratar	1.20	0.5	2.9	2.9
Shot peening A	1.13	6.4	39.9	57.0
Shot peening B	1.14	5.8	35.4	48.9
Laser 1GW/cm ²	1.18	1.1	8.5	10.1
Laser 2GW/cm ²	1.19	1.4	11.7	13.5

En esta tabla se ve cómo ambos tratamientos de laser peening presentan un coeficiente de rozamiento similar y una rugosidad algo mayor que la del material sin tratar. Por el contrario, en el material tratado con shot peening, se observa un aumento considerable de la rugosidad superficial, así como un ligero descenso del coeficiente de rozamiento.

4.2 Dureza Vickers

Es sabido que los tratamiento de shot y laser peening producen cambios en las durezas de los materiales en los que se aplican [13], y como consecuencia de ello también se modifica en el comportamiento a fatiga. Por este motivo, es importante ver en qué medida ha sido modificada la dureza del material por efecto de los diferentes tratamientos. La figura 4 muestra la variación con respecto a la profundidad de la dureza Vickers HV 02 medida para cada uno de los tratamientos. También se muestra la dureza del material virgen a modo de referencia.

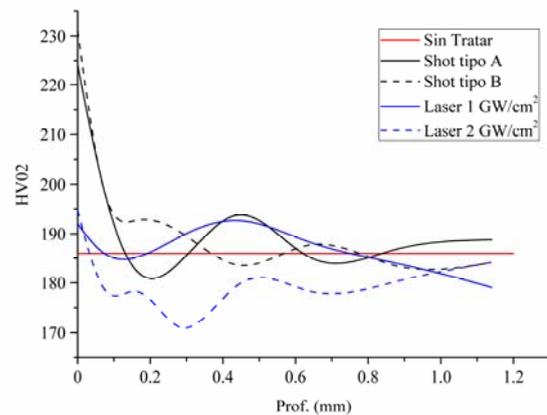


Figura 4. Variación de las durezas de los diferentes tratamientos con la profundidad

Lo primero que se observa en esta figura, es cómo todos los tratamientos producen un endurecimiento, más o menos apreciable, en las zonas cercanas a la superficie, siendo este endurecimiento bastante mayor en el caso de los tratamientos de shot peening. Comparando el endurecimiento producido por el shot tipo A con el del shot tipo B, se ve que ambos son similares, esto es, el valor máximo de la dureza se produce en la superficie y decae conforme aumenta la profundidad, hasta llegar a un determinado punto donde los valores oscilan en torno al valor de la dureza del material sin tratar. Estas medidas obtenidas con los tratamientos de shot peening, indican que las propiedades mecánicas del material, por lo menos en las cercanías de la superficie, pueden haber mejorado. En lo que respecta a los tratamientos de laser peening, el comportamiento difiere de una a otra intensidad. En el caso del laser de 1GW/cm², se produce un pequeño aumento del valor de la dureza en la superficie y posteriormente esta fluctúa alrededor del valor de material no tratado, por lo que se puede pensar que en este tipo de tratamiento no se produce un cambio significativo de la dureza, y por lo tanto, tampoco de las

propiedades mecánicas. En lo que respecta al laser de 2GW/cm², en la superficie se produce un aumento similar al del laser de 1GW/cm², pero al aumentar la profundidad se produce una apreciable disminución del valor de la dureza, de lo que se deriva que en esta zona las propiedades mecánicas del material han podido empeorar.

4.3 Ensayos realizados

Se han ensayado mediante el útil descrito anteriormente diversas probetas con los diferentes tipos de shot y laser peening. Estos ensayos se han realizado con cinco combinaciones diferentes de carga. La tabla 3 muestra los parámetros de carga utilizados junto con la vida a fatiga por fretting en ciclos N_f para cada uno de los ensayos. Los parámetros mostrados son la tensión axial σ (MPa) creada en la probeta por la carga axial P , la carga normal aplicada N (N) y las cargas tangenciales medidas con las células tangenciales colocadas en A y B, Q_a (N) y Q_b (N).

Tabla 3. Vida de los ensayos realizados

Trat.	Tipo ensayo	σ	Q_a	Q_b	N	N_f
SP A	90/1100/1200	90.7	1097	1069	1200	546671
SP A	100/1100/1200	99.3	1010	1075	1200	330796
SP A	110/900/1000	112.0	918	725	1000	1526128*
SP A	125/900/1000	123.8	868	946	1000	947249*
SP A	125/900/1000	124.6	902	830	1000	124677
SP A	125/600/650	124.1	597	530	650	1206145*
SP A	125/600/650	126.2	582	611	650	660564*
SP B	90/1100/1200	91.3	1107	1049	1200	3062815*
SP B	100/1100/1200	102.2	1106	1048	1200	1397699*
SP B	100/1100/1200	100.6	1108	1080	1200	1558286*
SP B	110/900/1000	106.2	915	894	1000	1483296*
SP B	125/900/1000	125.5	861	907	1000	840626*
SP B	125/600/650	126.3	587	596	650	1721474*
SP B	125/600/650	123.2	557	609	650	1089263*
LP 1GW	90/1100/1200	92.1	1106	1096	1200	222921
LP 1GW	100/1100/1200	97.9	1097	1057	1200	226254
LP 1GW	110/900/1000	108.0	802	867	1000	142311
LP 1GW	125/900/1000	126.3	785	860	1000	249289
LP 1GW	125/900/1000	127.5	895	910	1000	160510
LP 1GW	125/600/650	124.6	571	597	650	213187
LP 1GW	125/600/650	122.8	599	589	650	211075
LP 2GW	90/1100/1200	92.1	1099	1111	1200	231045
LP 2GW	100/1100/1200	98.3	1096	1070	1200	190805
LP 2GW	110/900/1000	111.6	849	923	1000	162137
LP 2GW	110/900/1000	108.5	870	895	1000	2437816*
LP 2GW	125/900/1000	124.4	980	1005	1000	272231
LP 2GW	125/600/650	125.3	566	599	650	284193

* Ensayos donde el fallo se ha producido fuera de la zona afectada por fretting

También se realizaron otros ensayos con las mismas cargas y tratamientos, pero en este caso modificando el acabado superficial, con el objetivo de cuantificar el efecto de la rugosidad superficial en la vida a fatiga por fretting. En estos todos estos casos, después del shot o laser peening, se pulieron las probetas, hasta obtener un acabado superficial similar al de las probetas sin tratar. Con ello se pretende tener un contacto esfera-plano más parecido al teórico de superficies planas y lisas. La tabla 4 muestra las rugosidades obtenidas en cada caso,

después del pulido. En la tabla 5 se muestran los resultados de los ensayos realizados con estas probetas.

Tabla 4. Rugosidades superficiales de los diferentes tratamientos después del pulido

	μ	Rug. sup. (μm)		
		R_a	R_z	R_t
Shot peening A	1.18	0.2	1.4	1.9
Shot peening B	1.18	0.2	1.7	2.7
Laser 1GW/cm ²	1.21	0.2	1.5	1.9
Laser 2GW/cm ²	1.19	0.2	1.5	2.3

Tabla 5. Vida de los ensayos con la rugosidad modificada

Trat.	Tipo ensayo	σ	Q_a	Q_b	N	N_f
SP A	90/1100/1200	90.6	1072	1090	1200	283522
SP A	100/1100/1200	102.1	1099	1099	1200	191755
SP A	110/900/1000	108.6	906	903	1000	238394
SP A	125/900/1000	123.7	859	900	1000	196035
SP A	125/600/650	123.9	562	602	650	588006*
SP B	90/1100/1200	89.9	1047	1086	1200	630914
SP B	100/1100/1200	101.1	1097	1103	1200	282083
SP B	110/900/1000	112.0	900	906	1000	1236088*
SP B	125/900/1000	122.8	571	602	1000	201385
SP B	125/600/650	125.3	888	895	650	1056374*
LP 1GW	90/1100/1200	92.1	1045	1088	1200	159956
LP 1GW	100/1100/1200	100.3	1095	1107	1200	142113
LP 1GW	110/900/1000	111.4	901	899	1000	133337
LP 1GW	125/900/1000	126.4	896	894	1000	90418
LP 1GW	125/600/650	126.1	580	605	650	148956
LP 2GW	90/1100/1200	88.2	1030	1097	1200	491557
LP 2GW	100/1100/1200	101.2	1101	1099	1200	201975
LP 2GW	110/900/1000	113.2	901	897	1000	170656
LP 2GW	125/900/1000	126.6	878	900	1000	169456
LP 2GW	125/600/650	124.7	570	599	650	213555

* Ensayos donde el fallo se ha producido fuera de la zona afectada por fretting

En esta nueva situación se observan una serie de diferencias con respecto a la situación anterior. La primera es que únicamente en tres de las probetas ensayadas se ha producido el fallo fuera la zona de contacto, pero conservando la similitud con la situación anterior de que este tipo de rotura sólo se da en las probetas tratadas con shot peening, y que además el shot peening tipo B sigue siendo el que presenta un mayor número de fallos de este tipo. La segunda diferencia notable es la disminución general de la vida a fretting fatiga de las probetas con shot peening, pues ensayos que antes del pulido presentaban una fractura por fatiga simple, ahora lo tienen por fretting. Sin embargo, no hay una diferencia apreciable en la vida de una serie de ensayos realizados sobre probetas tratadas con shot peening, que con este nuevo acabado superficial también presentan una rotura fuera de la zona afectada por fretting.

Por último para estudiar cómo afectan únicamente las tensiones residuales a la fatiga por fretting, se han repetido todos los diferentes tipos de ensayos, pero en esta ocasión con probetas sin tratar. Los resultados de estos ensayos se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6. Vida de los ensayos realizados con probetas sin tratar

Tipo ensayo	σ	Q_a	Q_b	N	N_f
90/1100/1200	89.6	1093	1097	1200	55759
100/1100/1200	100.5	1052	1092	1200	51787
110/900/1000	112.4	880	894	1000	59793
125/900/1000	123.6	857	914	1000	65614
125/600/650	125.3	603	605	650	52499
125/600/650	126.2	562	569	650	47379

A modo de resumen, en la figura 5 se muestran las vidas resultantes de todos los ensayos realizados. Lo primero que se aprecia observando los resultados mostrados en la figura 5 es que, en mayor o menor grado, todos los tratamientos con uno u otro acabado superficial producen un incremento significativo de la vida. Este incremento de la vida en general es mayor para aquellas probetas cuya rugosidad superficial no ha sido modificada, y dentro de estas las que tienen el tratamiento de shot peening tipo B son las que presentan una vida mayor.

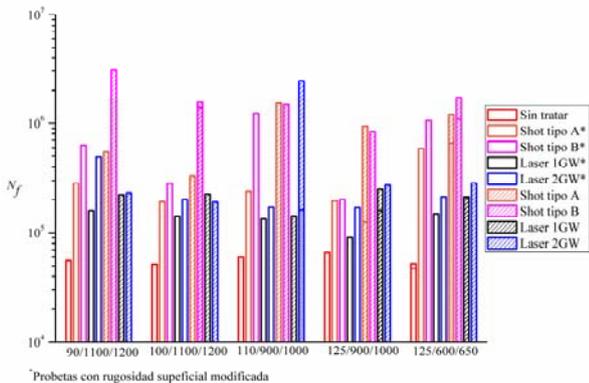


Figura 5. Comparación de la vida a fatiga por fretting de los diferentes tipos de ensayos realizados

4.4 Relajación de las tensiones residuales

Un aspecto importante de las tensiones residuales es su estabilidad. Es sabido que cargas cíclicas, incluso aquellas que producen niveles bajos de tensiones, y cargas estáticas que producen tensiones superiores al límite de fluencia, tienen como consecuencia una relajación del campo de tensiones residuales [14]. Con el objetivo de cuantificar la relajación del campo de tensiones residuales en los ensayos llevados a cabo, se han realizado una serie de medidas sobre probetas que han sido cicladas durante 20.000 ciclos, y que posteriormente han sido retiradas del útil de ensayos para medir las tensiones residuales resultantes. Las tensiones han sido medidas entre el borde de la zona de contacto y la zona de adhesión, tal y como se muestra en la figura 6.

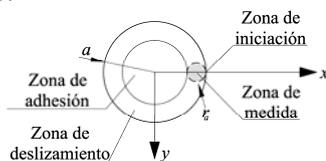


Figura 6. Zona de medida de las tensiones

Se han utilizado dos niveles de carga, correspondientes con dos de los tipos de ensayos realizados, estos son: $\sigma=125\text{MPa}$, $Q=900\text{N}$, $N=1000\text{N}$ (tipo I) y $\sigma=125\text{MPa}$, $Q=600\text{N}$, $N=650\text{N}$ (tipo II). En las figuras 7, 8, 9 y 10 se muestran las variaciones del campo de tensiones residuales que sufren cada uno de los diferentes tratamientos, para los dos tipos de cargas utilizados. Comentar de nuevo que al igual que en la sección anterior, cada una de las distribuciones de tensiones residuales mostradas a continuación se han obtenido realizando la media de dos medidas.

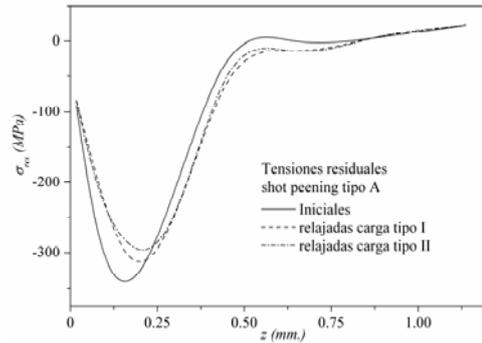


Figura 7. Tensiones residuales iniciales y relajadas para el shot peening tipo A

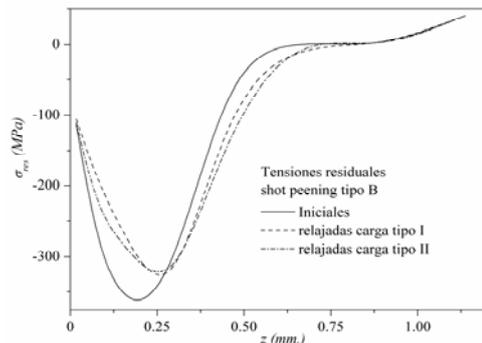


Figura 8. Tensiones residuales iniciales y relajadas para el shot peening tipo B

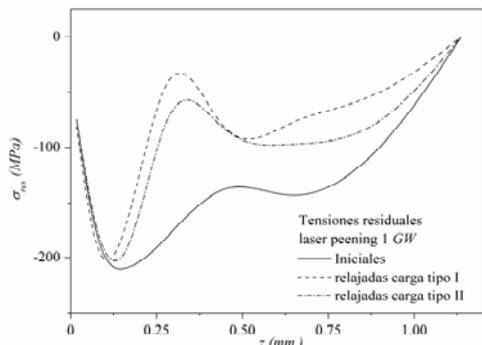


Figura 9. Tensiones residuales iniciales y relajadas para el laser peening 1GW/cm²

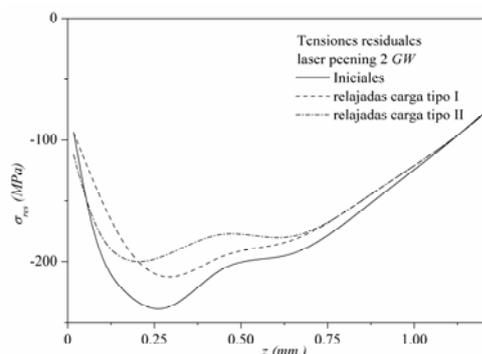


Figura 10. Tensiones residuales iniciales y relajadas para el laser peening $2\text{GW}/\text{cm}^2$

Mencionar que la relajación medida del campo de tensiones residuales corresponde en parte a una relajación debida a cargas estáticas que producen flujo plástico en los primeros ciclos de carga, y por otra parte a la acción continuada de las cargas cíclicas a las que se encuentra sometida la zona afectada por fretting.

En resumen, de los cuatro tratamientos analizados, los de shot peening en general sufren una menor relajación que los de laser peening. De todos ellos, el laser peening de $1\text{GW}/\text{cm}^2$ es el que desarrolla una mayor relajación de las tensiones residuales. También se ve como la relajación en ambos tratamiento de shot es bastante similar, aunque un poco mayor en el caso del shot peening B, al contrario de lo que ocurre con las de laser peening donde si hay diferencias notables entre las intensidades de $1\text{GW}/\text{cm}^2$ y $2\text{GW}/\text{cm}^2$. Así mismo, cabe destacar como en la totalidad de los tratamientos analizados la relajación en zonas cercanas a la superficie es despreciable.

5. CONCLUSIONES

La primera conclusión es el efecto beneficioso de los tratamientos de shot peening, frente a la fatiga por fretting. Este efecto, es bastante más notable para los ensayos que se han realizado con probetas cuya rugosidad es la original, particularmente para las probetas tratadas con shot peening tipo A y B. Los ensayos realizados muestran el importante efecto que tiene la rugosidad superficial en la vida, siendo muy notable en los tratamientos de shot peening. En estos casos, en las probetas con acabado superficial modificado, se produce una disminución de la vida, en ambos tipos de shot peening, cercano a unas 3 veces con respecto de las probetas ensayadas con la rugosidad original. Otro efecto notable en todos los tratamientos analizados, es la relajación que se produce en el campo de tensiones residuales después de 20.000 ciclos. Este efecto, es sobre todo muy importante en los tratamientos de laser peening, destacando la relajación de tensiones sufrida por el laser de $1\text{GW}/\text{cm}^2$ de intensidad. Merece la pena destacar que aunque la relajación sufrida por el laser de $1\text{GW}/\text{cm}^2$ es mayor que la del laser de $2\text{GW}/\text{cm}^2$, este fenómeno no se ve reflejado en las vidas de los ensayos realizados, ya que ambas intensidades ofrecen vidas similares. Por último, mediante las

medidas de dureza Vickers realizadas, se muestra cómo los tratamientos de shot y laser peening cambian la microestructura del material. En todos los tratamientos analizados se observa un endurecimiento del material cerca de la superficie, siendo este bastante importante para ambos tratamientos de shot peening. También se observa cómo para el laser de $2\text{GW}/\text{cm}^2$ se produce una disminución apreciable de la dureza Vickers a partir de unas $100\mu\text{m}$ de profundidad. Este fenómeno quizás explique, en cierto modo, por qué este tratamiento no supone una mejora sustancial con respecto al laser de $1\text{GW}/\text{cm}^2$, a pesar de producir el laser de $2\text{GW}/\text{cm}^2$ un campo de tensiones residuales mayor y más estable que el creado por el laser de $1\text{GW}/\text{cm}^2$.

REFERENCIAS

- [1] Waterhouse, R. B. and Lindley, T. C. ESIS Publication 18. MEP, London, 1994.
- [2] Domínguez, J. (2000) Algunas Consideraciones sobre la Fatiga por Fretting y sus Paliativos, *Anales de la Mecánica de la Fractura*, **17**, pp. 89-102.
- [3] Kevin, K.,L. ,Michael, R., H. (2009) The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons, *T. Int.*, **42**, pp. 1250-1262.
- [4] Wittkowsky, B.U., Birch, P.R, Domínguez, J. and Suresh, S. (1999) An Apparatus for Quantitative Fretting-Fatigue Testing, *Fat. Fract Eng. Mat. Struct.*, **22**, pp. 307-320.
- [5] Muñoz, S. (2007) Estimación de Vida a Fatiga por Fretting; Aplicación a Componentes Recubiertos, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- [6] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (2004) ASTM Int., 24 pp.
- [7] Boller, C. and Seeger, T. (1998) Materials Data for Cyclic Loading, Elsevier Publishing Company.
- [8] Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM Standard E 837.
- [9] Schajer, G.S. (1998) Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method, part I, *J. Eng. Mater. Technol.*, **110**, pp. 338-343.
- [10] Schajer, G.S. (1998) Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method, part II, *J. Eng. Mater. Tech.*, **110**, pp. 344-349.
- [11] Waterhouse, R. B. and Trowsdale, A. J. (1992) Residual Stress and Surface Roughness in Fretting Fatigue, *J. Phys. D*, **25**, pp. A236-A237.
- [12] Muñoz, S., Navarro, C. y Domínguez, J. (2004) Influencia del Coeficiente de Rozamiento en Fretting, *Anales de Mecánica de la Fractura*, **21**, pp. 197-202.
- [13] Peyre, P., Fabbro, R., Merrien, P. and Lieurade, H.P. (1996) Laser Shock Processing of Aluminum Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour, *Mat. Sci. Eng.*, **A210**, pp. 102-113.
- [14] Kodama, S. (1972) The Behavior of Residual Stress During Fatigue Stress Cycles, *Procs. Int. Conf. Mech. Behavior of Metals II, Soc. Mat. Sci.*, **2**, pp. 111-118.