

ESTUDIO DE LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE SHOT PEENING Y SU EFECTO EN EL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LOS ACEROS

A.T. Vielma, V. Llanea y F.J. Belzunce¹

¹Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Escuela Politécnica de Ingeniería. Universidad de Oviedo. Campus Universitario. 33203. Gijón. Principado de Asturias. España.
E-mail: vielmaana@uniovi.es / llanezavictor.uo@uniovi.es / belzunce@uniovi.es

RESUMEN

Se han realizado tratamientos de shot peening (SP) de alta intensidad (21A) sobre un acero F1272 templado y revenido. Un efecto determinante de la vida a fatiga en componentes con SP es el daño superficial, que hemos valorado a partir del parámetro de rugosidad, R_{\max} . Se han llevado a cabo procedimientos para disminuir este parámetro, mediante la aplicación tanto de segundos tratamientos de SP de baja intensidad, como a partir de la eliminación de la superficie dañada del material, utilizando para ello técnicas de pulido mecánico y electropulido.

La aplicación de los segundos tratamientos ha permitido reducir la rugosidad máxima de las probetas. Por otro lado, los análisis mediante difracción de rayos X han demostrado que los segundos tratamientos de SP de menor intensidad apenas modifican la tensión residual de compresión superficial obtenida con el primer tratamiento y que cuando se elimina una pequeña profundidad de material superficial dañado, la tensión residual superficial aumenta, de acuerdo con el perfil del primer tratamiento. En cuanto al comportamiento a fatiga, todos los dobles tratamientos han conseguido mejorar la vida fatiga que se había obtenido con el primer tratamiento de alta intensidad, aunque en ningún caso se ha logrado alcanzar la vida a fatiga que se había conseguido al emplear el tratamiento óptimo de 10A para este material.

ABSTRACT

A F1272 steel has been treated by means of high intensity shot peening (21A) treatments. It is well known that a determining effect on the fatigue life of shot peened components is surface damage, which it was evaluated from the roughness R_{\max} parameter. Secondary treatments have been implemented to reduce the roughness through low intensity shot peening treatments and also by removing the damaged surface by means of polishing techniques, both mechanically and electrochemically.

After the secondary treatments, R_{\max} has always been reduced. By the other hand, X-ray diffraction analysis have shown that secondary shot peening treatments have not affected the surface compressive residual stress produced in the first treatment and when a thin surface layer is removed, the surface compressive residual stresses increases, in correspondence with the 21A residual stress profile. In the case of the fatigue performance, all the double treatments have increased the fatigue life of the single high intensity 21A shot peening treatment, although anyone has attained the fatigue life of the optimal shot peening treatment previously defined with this material (10A)

PALABRAS CLAVE: Fatiga, Shot peening, Tensiones residuales.

1. INTRODUCCIÓN

En el trabajo presentado en el XIX Encuentro del GEF se describieron los parámetros de trabajo, los efectos del proceso de shot peening y la influencia en la vida a fatiga del acero F1272. La experimentación había

consistido en realizar diversos ensayos de shot peening (SP) a diferentes intensidades Almen y evaluar el comportamiento a fatiga del material con los diferentes tratamientos. Se obtuvo que el tratamiento de SP realizado con una intensidad 10A era el más adecuado por generar en el material un campo de tensiones

residuales suficientemente amplio sin llegar a dañar la superficie, en consecuencia se aumentó la vida a fatiga [1].

En el citado trabajo se obtuvo que cuanto mayor es la intensidad Almen (IA) aplicada, se induce un campo de tensiones residuales de compresión (TRC) más amplio en profundidad, que dificulta la propagación de las grietas por fatiga. Sin embargo, el acabado superficial producido por tratamientos de SP de alta intensidad será desfavorable, pudiendo generarse defectos superficiales que deteriorarían el comportamiento del material ante cargas cíclicas.

La Figura 1 muestra el perfil de tensiones residuales logrado tras tratamientos de SP de intensidades 10A (óptima, en este caso) y 21A (alta intensidad) y pone de manifiesto que mientras la profundidad afectada por las tensiones superficiales de compresión es de aproximadamente 250 μm tras el tratamiento de 10A, en el caso del tratamiento de 21 A llega hasta casi 450 μm . En este contexto, en este trabajo se han diseñado segundos tratamientos superficiales con objeto de disminuir el parámetro de rugosidad, afectando lo menos posible al perfil de tensiones residuales introducido previamente. De esta manera se trata de evaluar la posibilidad de mejorar aún más el comportamiento a fatiga de los materiales. En esta misma línea, Scuracchio et al [2] advierten que al realizar segundos tratamientos de shot peening de menor intensidad (menor tamaño de proyectil) es posible incrementar sensiblemente la vida a fatiga de los materiales y disminuir la dispersión de los resultados obtenidos.

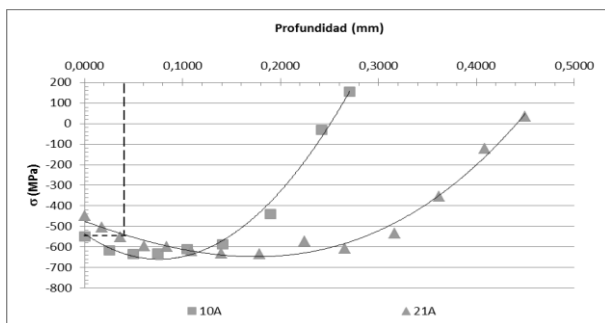


Figura 1. Comparación del campo de tensiones residuales de compresión tras SP 10A y 21A (F1252).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Material de partida

El material objeto de estudio ha sido una barra de 16 mm de diámetro de acero F1272 (41NiCrMo7-3-2). El acero fue suministrado en estado de temple y revenido (850°C/45 min + 590 °C durante 150 minutos). A continuación se presentan, en la Tabla 1, las

propiedades mecánicas obtenidas en la caracterización de este material.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero F1272

E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)	Z (%)	HV (kg/mm ²)
188	924	1 197	11,6	49	357

2.2. Proceso de shot peening

Los procesos de shot peening fueron realizados en una máquina neumática de proyección por presión directa, constituida por una cabina modelo GUYSON Euroblast 4 PF, un depósito tipo G27, ciclón motorizado tipo 75/16 y colector de polvo modelo DC400.

Se han utilizado proyectiles metálicos de alambre cortado, tipo CW (cut wire) y de vidrio (AGB, glass bead) respectivamente [3]. Para obtener diferentes intensidades Almen, se trabajó con proyectiles esféricos de 0,2, 0,3 y 0,7 mm de diámetro. Éstos fueron analizados con una lupa estereoscópica y el procesador de imágenes *Enterprise Omnimet de Buehler*. La imágenes fueron interpretadas tomando como referencia la norma AMS-S13165 [4] para verificar la distribución de tamaños.

El procedimiento de obtención de la intensidad Almen (IA) se llevó a cabo en base a las especificaciones SAE J442 [5] y SAE J443 [6]. La intensidad Almen está directamente relacionada con los parámetros de proyección: presión, naturaleza y diámetro de los proyectiles. Durante los ensayos se ha garantizado un ángulo de 90° entre el flujo de bolas y las placas Almen. En la Tabla 2 se especifican las condiciones de trabajo y las intensidades Almen (IA) obtenidas.

Los tratamientos de shot peening se realizaron mediante la exposición de las probetas al flujo de proyectiles manteniendo una distancia entre la boquilla y la pieza de 230 mm, y para garantizar la cobertura total, las piezas se sujetaron a un dispositivo giratorio. Mediante la determinación del grado de cobertura (GC) se construyeron las curvas de Avrami respectivas para cada IA. A partir de dichas curvas se determinó el número de vueltas necesarias para garantizar en las probetas un GC del 100% (Tabla 2).

Tabla 2. Intensidad Almen

Proyectil	Material	Presión (bares)	IA (A)	Nº Vueltas
0,2	AGB	2	5	28
0,3	CW	2	8	28
0,7	CW	4	21	30

2.2.1. Dobles tratamientos de SP

El tratamiento de “alta intensidad” se refiere a la intensidad Almen de 21A. Tras este tratamiento de 21A se procedió a realizar segundos tratamientos de SP. Se aplicaron dos segundos procesos de SP de baja intensidad, el primero a 8A y el otro a 5A. La nomenclatura empleada para los dobles tratamiento de SP es 21A+8A CW y 21A+5A AGB. Estos segundos tratamientos de shot peening se realizaron con un 200% de cobertura, con objeto de asegurar su efecto sobre una superficie previamente endurecida por el primer tratamiento.

2.2.2. Eliminación de la capa superficial

En otra serie de probetas se procedió a eliminar la capa superficial dañada por el tratamiento SP de 21A mediante la aplicación de un procedimiento mecánico y otro electroquímico. Para ello se procedió a disminuir el radio de la probeta en aproximadamente 40 μm , valor que se aproxima al parámetro $R_{\text{máx}}$ promedio del SP a 21A.

El procedimiento mecánico (PM) consistió en utilizar un torno y papel abrasivo fino (grano 600-1200) para eliminar la superficie del material hasta 35-40 μm . Posteriormente se pulió la pieza con pasta de diamante de 6 y 1 μm .

El procedimiento químico se ha realizado dentro de un dispositivo dotado con una placa metálica como cátodo y el electrolito II1[7]. El montaje consistió en una celda electrolítica, en la cual la probeta con el tratamiento SP 21A actuó como ánodo. Ésta se disolvió anódicamente en el electrolito hasta obtener una reducción del radio de aproximadamente 40 μm . El resultado superficial de los procedimientos, electropulido (EP) y pulido mecánico, ha sido caracterizado mediante DRX y medidas de rugosidad.

2.3. Técnicas de caracterización

2.3.1. Acabado superficial. Rugosidad

La evaluación de la rugosidad de las probetas se llevó a cabo mediante el uso del rugosímetro DIAVITE DH-6. Este dispositivo proporciona 6 parámetros diferentes de rugosidad, pero se ha considerado que el parámetro más representativo del daño es la rugosidad máxima ($R_{\text{máx}}$), que evalúa la distancia entre el pico y valle máximos en una longitud de medida determinada ($l = 1 \text{ mm}$).

2.3.2. Determinación de las tensiones residuales de compresión. DRX

La determinación de las tensiones residuales mediante la técnica de difracción de rayos X se basa en evaluar la distorsión sufrida por la red cristalina del material [8]. En la experimentación realizada se ha empleado un

patrón de ferrita, debido a que el material de trabajo ha sido un acero de medio carbono, templado y revenido. A continuación, en la Tabla 3 se muestran los parámetros establecidos tanto para la calibración del equipo de difracción de rayos X (Marca: STRESSTECH 3000, modelo: G2R), como para la realización de las medidas.

Manteniendo los parámetros de la calibración, se realizó la medida de la tensión residual superficial tras los segundos tratamientos (8A, 5A, PM o EP) y se comparó con la del primer tratamiento de 21A.

Tabla 3. Parámetros de trabajo

Índices de Miller (hkl)	211	$\theta_{\text{trabajo}} (^{\circ})$	156
Tubo	Cr	$E/(1+\nu)$	168 900
Medición $K\alpha_1$ (nm)	0,22897	$V_{\text{máx}}$ (V)	30

La caracterización de las tensiones se realizó en tres puntos sobre la zona calibrada de la probeta normalizada y se hicieron igualmente tres medidas circunferenciales de 90 en 90° en el punto central (Figura 2).

Se aplicó el ajuste matemático Pseudo-Voigt a las mediciones realizadas con la finalidad de eliminar los problemas de ruido que pudieran afectar a la señal detectada.

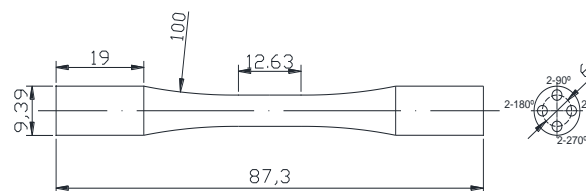


Figura 2. Puntos de medida de las tensiones residuales en las probetas de fatiga de flexión rotativa

2.3.3. Determinación de la vida a fatiga.

Tras la aplicación de los segundos tratamientos de shot peening, se realizaron ensayos de fatiga alternativa sobre las probetas del acero 41NiCrMo7. Los ensayos se realizaron en la máquina de *Ensayo de Fatiga de Viga Rotativa de Alta Velocidad*, Modelo R. R. Moore de Instron. La geometría y dimensiones de las probetas utilizadas se exponen en la Figura 2.

Los ensayos de fatiga de flexión rotativa ($R=-1$) se llevaron a cabo en todos los casos utilizando una tensión de trabajo (tensión máxima superficial en el ensayo de flexión en cuatro puntos) alterna aproximadamente igual al 50% de la resistencia a la tracción del acero ($\sigma_a = 599 \text{ MPa}$). Se han ensayado de este modo probetas tras

tratamientos simples de SP de 10A y 21A, tratamientos dobles (21A+8A y 21A+5A) y tratamientos dobles con eliminación del daño superficial (21A+EP y 21A+PM). A modo de comparación, se indicará igualmente la vida a fatiga medida en probetas de este acero directamente mecanizadas y pulidas. En todos los casos se ha utilizado un total de tres a cinco probetas en cada condición.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Medición del acabado superficial

Tras la aplicación del primer tratamiento de shot peening, utilizando una intensidad de 21A, se llevó a cabo la medida de la rugosidad de las probetas a través del parámetro $R_{m\acute{a}x}$ y estas mismas medidas se repitieron tras los segundos tratamientos (véase la Figura 3). Se puede observar que la rugosidad máxima ha disminuido tras los tratamientos dobles en virtud de la influencia directa que sobre este parámetro tiene el tamaño de las huellas creadas en los impactos, que a su vez dependen tanto de la intensidad Almen aplicada como del tamaño de los proyectiles. En este caso, los segundos tratamientos se realizaron con proyectiles de menor tamaño y bajo una intensidad Almen muy inferior a la del primer tratamiento, con objeto de disminuir la rugosidad sin afectar significativamente el campo de tensiones residuales de compresión. Se comprueba que en el caso de los tratamientos dobles, la mayor disminución de rugosidad máxima tuvo lugar cuando se utilizó el segundo tratamiento con la menor intensidad (21A+5A AGB).

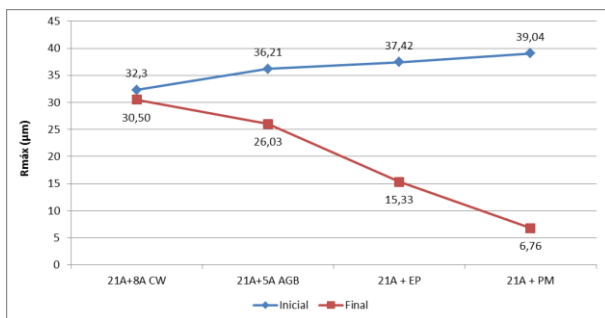


Figura 3. Evolución de $R_{m\acute{a}x}$ tras primer tratamiento (21A) y segundos tratamientos

Por otro lado, en los dos casos en los que se ha llevado a cabo la eliminación de la capa más defectuosa superficial (PM y EP), se ha obtenido una rugosidad máxima bastante inferior, como cabría esperar, especialmente tras el tratamiento de pulido mecánico.

En el caso del pulido mecánico, la disminución de la rugosidad se debe al desbaste de la superficie deformada plásticamente que más sobresale del perfil medio

(crestas). La acción del papel abrasivo y el pulido, es selectiva y al eliminar las crestas se obtienen zonas perfectamente lisas, mientras que los valles más profundos lucen como pequeños defectos superficiales. Por otro lado, el proceso del electropulido no es selectivo. Al introducir la pieza en el electrolito, este penetra en las concavidades de la superficie y tras el paso de corriente, toda la superficie en contacto con el líquido se disuelve. En este caso las crestas y los valles se reducen más o menos en la misma proporción.

3.2. Determinación de las tensiones residuales de compresión

Se ha evaluado la influencia que ejerce la aplicación de un segundo tratamiento sobre el campo de tensiones residuales de compresión. Los resultados obtenidos se presentan en las Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4. Tensiones residuales superficiales de compresión tras dobles tratamientos de shot peening

σ (MPa)		$\Delta\sigma$ (MPa)	σ (MPa)		$\Delta\sigma$ (MPa)
21A	21A+8A	21A+8A	21A	21A+5A	21A+5A
-391	-408	-17	-431	-491	-60

En la Tabla 4 puede notarse que el segundo tratamiento de shot peening no tiene apenas influencia sobre la tensión superficial residual de compresión. La variación presentada con respecto al tratamiento de 21A es un valor que se sitúa dentro del intervalo de la incertidumbre expandida de las mediciones por difracción de rayos X (la cual involucra los efectos de medición del equipo, incertidumbre estadística, etc.). La incertidumbre expandida para las probetas de 21A era de ± 40 MPa.

Por otro lado, la Tabla 5 muestra los valores de la tensión residual promedio de las probetas sobre las que se practicaron los procesos de pulido mecánico y electropulido. El parámetro X representa el espesor medio eliminado en las probetas utilizadas con cada procedimiento. Como se observa en la Figura 1, al eliminar la capa más superficial del material, se alcanzan regiones con una tensión residual mayor, de manera que en estos casos, tras los segundos tratamientos se han medido tensiones residuales superficiales mayores (σ_x en la Tabla 5), lo que en principio constituye un efecto beneficioso desde el punto de vista del comportamiento a fatiga.

El valor de la tensión residual superficial de compresión (ver Tabla 5) representa aproximadamente el 60% del límite elástico del material (924 MPa) y la variación promedio determinada entre la TR superficial inicial y final ha sido de unos 150 MPa. Esta diferencia debería contribuir al incremento de la vida a fatiga del material atribuida a estos segundos procedimientos.

Tabla 5. Tensiones residuales de compresión tras la eliminación de la capa superficial

Proceso	σ_0 (MPa)	X (mm)	σ_x (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
PM	-378	0,038	-556	-178
EP	-424	0,045	-547	-123

3.3. Comportamiento ante cargas cíclicas

En la Tabla 6 se compara la vida a fatiga media (y la desviación típica) de probetas del material de estudio tras diferentes acabados superficiales. Como se puede observar se ensayaron probetas pulidas, mecanizadas, tratadas con SP a 10 y 21A, las cuales sirvieron como punto de partida para los análisis, así como probetas a las que se le aplicaron los segundos tratamientos (21A+8A CW y 21A+5A AGB, 21A+EP y 21A+PM).

Tabla 6. Vida a fatiga tras los diferentes tratamientos de shot peening (desviación típica)

Tratamiento	Carga (kg)	N	$\pm S$
Mecanizado	25,5	41 650	17 030
Pulida		75 744	32 214
10A		136 691	25 367
21A		85 689	19 909
21A+8A CW		122 792	28 505
21A+5A AGB		104 959	12 704
21A+EP		101 089	986
21A+PM		105 840	43 276

Puede observarse que todos los tratamientos de shot peening analizados han incrementado la vida a fatiga del material estudiado en relación al estado bruto de mecanizado. El tratamiento más beneficioso ha sido el de 10A, que ha incrementado en un factor mayor de tres la vida a fatiga de las probetas mecanizadas [1]. Sin embargo, el tratamiento de 21A que mejora la vida a fatiga en un factor de dos, no ha sido tan efectivo como el anterior, y eso a pesar de haber generado un campo de tensiones residuales de compresión significativamente más profundo (véase Figura 1), lo que debe justificarse en virtud del mayor daño superficial que también genera. La aplicación de un segundo tratamiento tras el tratamiento de shot peening de alta intensidad (21A), dió lugar al efecto buscado en relación al daño superficial ya que, como se comentó sobre la Figura 3, todos estos segundos tratamientos han contribuido a disminuir significativamente los valores de la rugosidad máxima de las probetas.

En la Figura 4 se observa también que la aplicación de estos segundos tratamientos también han dado lugar a una mejora del comportamiento a fatiga si se compara

con el resultado obtenido cuando se empleó el tratamiento simple (21A), aunque en ningún caso llegó a alcanzarse la vida media a fatiga que se había obtenido al emplear el tratamiento óptimo de 10A. De cualquier manera se ha comprobado que la hipótesis de partida era correcta, de modo que al mejorar el acabado superficial, la concentración de esfuerzos disminuye y la vida a fatiga aumenta.

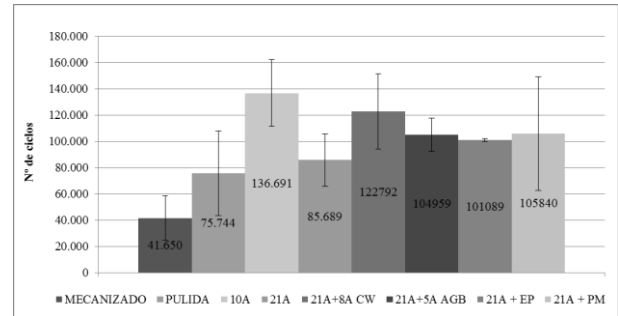


Figura 4. Comparativa de la vida a fatiga tras segundos tratamientos superficiales

En la Figura 5 se compara el factor de aumento de vida que proporcionan los cuatros segundos tratamientos analizados en relación a la vida a fatiga que se alcanza tanto con las probetas mecanizadas sin tratamiento alguno, como tras el primer tratamiento de alta intensidad (21A). A partir de este análisis, se puede comprobar que el mayor incremento de vida, con un porcentaje ligeramente superior al 40%, se ha conseguido al utilizar el tratamiento 21A+8A CW.

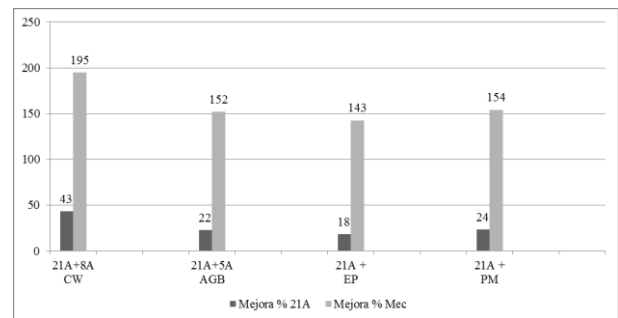


Figura 5. Incrementos de la vida a fatiga. Efecto de segundos tratamientos con respecto al tratamiento de SP 21A y a las probetas mecanizadas

Como se puede observar en la Figura 5, el resto de los segundos tratamientos analizados han mostrado un comportamiento a fatiga muy parecido, con un porcentaje de incremento de vida respecto al primer tratamiento de 21 A en torno al 20%. También se debe tener en cuenta que los tratamientos en los que se ha eliminado la región superficial dañada (en una profundidad de aproximadamente 40 μm), al haber aplicado la misma carga en los ensayos de fatiga, la tensión máxima aplicada ha sido ligeramente mayor, en un factor 1,04 (624 MPa), lo que en parte explicaría el hecho de no haber obtenido mejores resultados.

Tomando la ley de Basquin de fatiga determinada en este acero tratado con SP 10A ($\sigma_a = 1259 N^{-0.065}$), resulta que la vida media esperada bajo esta tensión sería de 45.100 ciclos. Se comprueba de este modo que la vida a fatiga de las probetas sometidas al tratamiento de alta intensidad, seguido de la eliminación de la zona superficial dañada bajo esta carga (101.000 y 106.000 ciclos) es más del doble que la del tratamiento óptimo de 10A. De acuerdo con el perfil de la tensión residual mostrado en la figura 1, al eliminar una profundidad de 40 μm , habría todavía una profundidad de aproximadamente 400 μm bajo tensiones residuales de compresión, valor apreciablemente mayor que la profundidad afectada por el tratamiento óptimo de shot peening de 10 A (250 μm).

Merece la pena también destacar la escasa variabilidad en el comportamiento a fatiga que se ha obtenido tras el tratamiento 21A+EP, que está fundamentado en que el proceso electroquímico no es selectivo. La capacidad del fluido para penetrar en las concavidades y/o defectos superficiales hace susceptible toda zona de contacto a la transferencia de masa del proceso electroquímico. De esta manera, cualquier defecto superficial y el perfil de rugosidad se suavizan y la concentración de esfuerzos en dichas zonas es menor.

De cualquier manera, se ha comprobado en este trabajo que el daño superficial generado al utilizar el tratamiento de shot peening más intenso, 21A, no ha podido ser completamente eliminado tras los segundos tratamientos practicados, por lo que el amplio campo de tensiones residuales de compresión desarrollado en el citado tratamiento no ha podido ser explotado convenientemente. A este respecto, parecería interesante contrastar el efecto en la vida a fatiga de llevar a cabo un primer tratamiento con una intensidad algo inferior (14-16A), que generaría menores defectos superficiales y aplicar posteriormente los mismos segundos tratamientos. Otra posibilidad a evaluar sería mantener el mismo primer tratamiento intenso de 21 A y realizar posteriormente una eliminación de material superficial en una profundidad algo mayor, como 50-60 μm , con el fin de asegurar la desaparición de la zona más defectuosa donde se inician las grietas de fatiga.

4. CONCLUSIONES

Se ha comprobado que la aplicación de segundos tratamientos, tanto de shot peening como de eliminación de la región superficial dañada, tras la aplicación de un primer tratamiento de alta intensidad siempre ha dado lugar a una mejora del comportamiento a fatiga si se compara con el resultado obtenido cuando se empleó el tratamiento simple (21A), habiéndose determinado incrementos de vida entre el 20% y más del 100%. Todos estos segundos tratamientos (shot peening de menor intensidad y eliminación de la región superficial

más dañada) reducen la rugosidad máxima de estos productos y no modifican en sentido negativo la tensión residual superficial de compresión (ésta incluso aumentaba cuando se eliminaba la región superficial dañada).

En el caso de los tratamientos dobles de shot peening no llegó a alcanzarse la vida media a fatiga que se había obtenido al emplear el tratamiento de shot peening óptimo de este material, de intensidad Almen 10A.

Es preciso, de cualquier forma tener en cuenta que la aplicación de un segundo tratamiento, bien sea de shot peening y más aún en el caso de la eliminación del daño superficial, supone un coste significativo y que solamente se aplicaría en productos industriales, si con ello se consiguiese incrementar la vida a fatiga considerablemente.

AGRADECIMIENTOS

V. Llana y A. T. Vielma agradecen respectivamente al Principado de Asturias, Programa Severo Ochoa de Ayudas Predoctorales (contrato BP10-021), y a la Fundación ITMA (contrato CN-070-05) la financiación necesaria para la realización del trabajo.

REFERENCIAS

- [1] A.T. Vielma, V. Llana y F.J. Belzunce. *Influencia de los parámetros de shot peening en la resistencia a la fatiga del acero 1272*. ISBN 0213-3725. XIX GEF. Marzo de 2012. Bilbao
- [2] Bruno Geoffroy Scuracchio, Nelson Batista de Lima, Cláudio Geraldo Schön. *Role of residual stresses induced by double peening on fatigue durability of automotive leaf springs*. Materials and Design, 2013.
- [3] Rodouopoulos, C., Curtis, S., De los Rios, E.R., Solis Romero, J., *Optimization of the fatigue resistance of 2024-T351 aluminium alloys by controlled shot peening-methodology, results and analysis*. International Journal Fatigue, 2004. 26: p. 846-856
- [4] AMS-S-13165, *Shot peening of Metal Parts*, in SAE International, SAE, Editor. 1997. p. 26.
- [5] SAE-J442, *Test strip, holder and gage for shot peening*, in SAE Aeroespacial engineering. 1995: USA.
- [6] SAE-J443, *Procedures for using standard shot peening test strip*, in SAE International. 1984: USA.
- [7] ASM Handbook, Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM International. *Chemical and Electrolytic Polishing, Table 3 Applicability of electrolytes in Table 2 to electropolishing of various metals and alloys*, 2004, p. 281-293.
- [8] NPL, *Determination of residual stresses by X-ray diffraction*, in Document N°. 52, National Physical Laboratory, 2005: UK.