

EFECTO DE LA APLICACION DE SOBRECARGAS EN EL CRECIMIENTO DE GRIETA DE TITANIO DE PUREZA COMERCIAL Y SUS UNIONES SOLDADAS

F.J. Estensoro, L.M. Plaza, A. Vega de Seoane y A.M. Irisarri

INASMET

Departamento de Materiales Metálicos
c. Portuetxe 12. 20009 San Sebastián.

Resumen. Se ha estudiado el efecto ejercido por la aplicación de una o múltiples sobrecargas de diversa magnitud en la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga. Este estudio se ha realizado sobre una chapa de 12 mm de titanio de pureza comercial, con probetas extraídas tanto en la orientación L-T como T-L, y las uniones soldadas de la misma por el proceso de soldadura por arco con electrodo no consumible bajo atmósfera de argón (GTAW). Se comprobó que la aplicación de estas sobrecargas induce un apreciable retraso en la propagación de la grieta. Este retraso es tanto más acusado conforme aumentan el número o la magnitud de las sobrecargas. Por otra parte, este efecto de las sobrecargas es sensiblemente menor en el metal depositado que en el material base.

Abstract. The effect induced by one or multiple overloads of various magnitudes on fatigue crack growth has been studied. Study was carried out on a 12mm thick commercially pure titanium plate, using specimens machined in the L-T and T-L orientations and its GTAW welded joints. It was observed that overloading produces a crack growth retardation. This retardation is higher when the number or the magnitude of the spike increase. Moreover, this influence of overloads on fatigue crack growth is more marked in base material than in weld metal.

1. INTRODUCCION

El retraso que se produce en la progresión de una grieta de fatiga como consecuencia de la aplicación de una o varias sobrecargas es un fenómeno que se ha observado en un gran número de materiales, tan diferentes como pueden ser un acero al cromo-molibdeno [1], un acero de alta resistencia [2], diversas aleaciones de aluminio [1, 3, 4] o de titanio [5].

Este retraso en la propagación de las grietas se ha asociado con el cierre que sufre esta y que se acentúa al aplicarse la sobrecarga. Sin entrar en detalles se debe indicar que se han propuesto distintos procesos de cierre de grieta tales como cierre inducido por la plasticidad generada en el extremo de la grieta, cierre inducido por rugosidad a causa del desajuste entre los picos y valles existentes en los labios de la grieta, cierre debido a la formación de gruesas capas de óxido en las superficies de fractura de la grieta, cierre ocasionado por una transformación de fase inducida por la tensión y el cierre inducido por el ligamento de la fase más tenaz que se produce en ciertos materiales bifásicos en que una de las fases es más susceptible de agrietarse facilitando la progresión de la fisura a lo largo de la misma pero dejando atrás algunos ligamentos que impidan que se

produzca la apertura total de la grieta [6].

En el caso del titanio de pureza comercial, al menos cuando el agrietamiento se produce en el aire, son los dos primeros mecanismos aquellos que presentan una mayor probabilidad de actuar. Concretamente, en un trabajo anterior, se comprobó que en condiciones de crecimiento de grieta bajo solicitaciones de amplitud constante el cierre de la misma venía condicionado por el mayor o menor grado de rugosidad existente en los labios de la grieta [7].

El objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto ejercido por la aplicación de una o varias sobrecargas de diversa magnitud en la velocidad de crecimiento de grieta y sobre el cierre experimentado por los labios de la misma.

2. TECNICA EXPERIMENTAL

El material base elegido para el presente estudio consistió en una chapa de 12 mm de espesor de titanio de pureza comercial, clasificado como grado 2 de acuerdo con las exigencias de la norma ASTM B265 [8]. La composición química y las características mecánicas

de esta chapa se ofrecen en las tablas I y 2 respectivamente.

Tabla I. Composición química de la chapa.

Fe	C	O	N	H	Ti
0.12	0.02	0.14	0.014	0.002	Resto

Tabla II. Propiedades mecánicas de la chapa.

Orien.	LE (MPa)	CR (MPa)	Alarg. (%)	E (GPa)
Long.	383	480	26.6	102.4
Trans.	480	529	26.9	108.8

Sobre varias muestras de esta chapa se efectuaron diversas uniones soldadas en dirección perpendicular a la de laminación. Para ello se empleó el proceso de soldadura por arco eléctrico bajo protección de argón (GTAW en la denominación del Instituto Internacional de Soldadura). Si bien se emplearon dos diferentes procedimientos de soldadura para la unión de estas muestras, las probetas utilizadas en el presente estudio provienen en su totalidad de uno de ellos designado como S.F. En este procedimiento se eligió un perfil en doble uve introduciendo un inserto de varilla en la raíz de la junta. Una descripción más amplia de las condiciones de soldadura puede encontrarse en la referencia [9].

De estas chapas, tanto de las de material base como de las uniones soldadas, se extrajeron probetas CT (B=12 mm, W= 108 mm), con la entalla situada en el metal base, tanto en la orientación L-T como T-L, metal depositado y zona afectada térmicamente. Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina servohidráulica de 100 KN. Estas probetas se ensayaron bajo condiciones de amplitud constante con una relación entre las cargas mínima y máxima de R=0.1. Una vez que se alcanzó un crecimiento estable de las grietas se disminuyó la frecuencia cíclica de ensayo aplicando seguidamente una o varias sobrecargas de mayor amplitud y registrándose tanto el efecto ejercido sobre la velocidad de crecimiento como el tiempo necesario para

que se recupere el ritmo existente con antelación a la aplicación de estas sobrecargas. El número de sobrecargas (N_{OL}) empleado en el presente estudio fue de 1, 2 o 4 y su magnitud tal que la relación entre el factor de intensidad de tensiones en la sobrecarga frente al máximo del ciclo anterior (K_{OL}/K_M) sea 1.25, 1.50 o 2.

Asimismo durante todo el ensayo se midió el tamaño de la grieta mediante un pequeño microscopio óptico acoplado a la máquina de ensayo, corrigiéndose estas medidas para tener en cuenta el efecto de curvatura de la grieta que pudiera llevar a infravalorar la longitud real de la misma. Con estos valores del tamaño de grieta y utilizando un programa de ordenador creado con este fin se obtuvo la velocidad de crecimiento de grieta. En esencia este programa ajusta mediante el método de mínimos cuadrados un polinomio de segundo grado a un grupo de siete puntos experimentales y efectúa el cálculo de la velocidad de crecimiento en el punto central (el cuarto del grupo de siete) mediante derivación del polinomio. A continuación, el cálculo de la velocidad de crecimiento en el quinto punto se obtiene mediante un nuevo ajuste de un polinomio a los puntos experimentales comprendidos entre el segundo y el octavo y derivación del mismo en el punto central. Repitiendo sucesivamente este proceso se obtiene la velocidad de crecimiento (da/dN) a lo largo de todo el ensayo.

Por otra parte se monitorizó el cierre de grieta por medio de un extensómetro situado en la boca de la entalla, registrándose los datos de la carga frente al desplazamiento de apertura de este extensómetro. La carga de apertura de grieta se obtuvo como el punto de intersección de la tangente a la zona curva de esta gráfica y la prolongación de su tramo lineal (figura 1).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

El primer punto conflictivo surge al elegir el criterio para valorar el retraso en la progresión de la grieta. Una primera alternativa consistiría en considerar que el efecto ejercido por la sobrecarga había desaparecido en el instante en que el nivel de cierre de grieta, medido en la forma indicada en la figura 1, era equivalente al existente con anterioridad a la aplicación de la sobrecarga. Desgraciadamente, posiblemente debido a una falta de la precisión necesaria en esta técnica de medida, los resultados obtenidos son poco consistentes con retrasos menores tras la aplicación de varias sobrecargas en algunas probetas y la tendencia contraria en otras. Por ello se ha desechado este procedimiento, al menos en tanto que no se mejore la técnica de medida.

Otra posibilidad consiste en considerar que se ha superado la influencia de la sobrecarga una vez que la velocidad de propagación de grieta alcanza el nivel

existente con anterioridad a la aplicación de esta sobrecarga. De acuerdo con esta técnica el número de ciclos de retraso corresponderá a N_D en la figura 2. Sin embargo, caso de no haberse aplicado la sobrecarga, la velocidad de crecimiento de grieta hubiera experimentado un cierto aumento durante este periodo por lo cual la medida así realizada representa una cierta infravaloración del efecto ejercido por la aplicación de la sobrecarga.

La tercera posibilidad consiste en comparar la ley de crecimiento de grieta registrada en estos ensayos con las obtenidas en otros efectuados en su totalidad bajo condiciones de amplitud constante. De acuerdo con esta metodología se considerará que el número de ciclos de retraso corresponde al valor N_D de acuerdo con la figura 3 en que la velocidad de crecimiento recobra el valor que le correspondería de acuerdo con un ensayo en condiciones de amplitud constante. El único inconveniente para este método pudiera encontrarse en la existencia de una dispersión de resultados entre una y otra probeta que dificultara la comparación. Afortunadamente, como muestra la figura 4, la reproducibilidad de resultados entre varias probetas es extraordinariamente buena dando validez al procedimiento. Para esta comparación se han empleado los datos de crecimiento de grieta bajo condiciones de amplitud constante registrados en dos trabajos previos [10-11].

La tabla 3 ofrece los resultados obtenidos en el ensayo de las probetas de material base y material depositado. El reducido número de resultados válidos de probetas con la entalla situada en la zona afectada, debido a la tendencia de la grieta a abandonar esta y progresar en el material base no permite llegar a ninguna conclusión sobre los mismos y no han sido incluidos en la mencionada tabla. Se observa que, tanto en material base como metal depositado, un incremento en el número y magnitud de las sobrecargas conduce a la necesidad de un mayor número de ciclos para recuperar la primitiva velocidad de crecimiento de grieta. Esta tendencia concuerda totalmente con la observada en otros materiales metálicos [1-5].

La comparación entre los valores registrados en los ensayos de las distintas probetas permite obtener algunas conclusiones. En primer lugar, no se detecta ningún efecto apreciable de la orientación de la entalla sobre el retraso provocado por las sobrecargas. Este resultado contrasta con los correspondientes a condiciones de amplitud constante en que se observó una menor velocidad de crecimiento [10] y un cierre de grieta más acentuado [12] en las probetas con orientación T-L. No se ha encontrado una explicación totalmente satisfactoria a este comportamiento siendo necesario un estudio más profundo y la realización de un mayor número de ensayos de probetas con orientación T-L antes de poder

Tabla III. Resultados de los ensayos.

Referen	N_{OL}	K_{OL}/K_M	N_D
L-T	1	1.25	900
	2	1.25	1850
	4	1.25	2500
L-T	1	1.50	1200
	2	1.50	3400
	4	1.50	7200
L-T	1	2.0	5200
	2	2.0	7400
	4	2.0	9250
T-L	1	1.25	650
	4	1.25	1650
T-L	1	1.5	1400
	2	1.5	3500
	4	1.5	5500
T-L	1	2.0	5100
S-F	1	1.25	150
	2	1.25	225
	4	1.25	550
S-F	1	1.50	300
	4	1.50	575
S-F	1	2.0	3600
	2	2.0	5200
	4	2.0	6850

afirmar que realmente no existe ningún efecto.

Se aprecia claramente que el número de ciclos necesario para recuperar la velocidad de crecimiento previa a la aplicación de la sobrecarga es notablemente menor en el metal depositado. Una explicación a esta tendencia se puede encontrar en el mayor límite elástico de este último que provoca que la zona plástica en el extremo de la entalla sea más reducida y pueda ser superada en un menor número de ciclos. Ello apunta a que el mecanismo responsable del cierre de grieta tras la aplicación de las sobrecargas es uno de cierre inducido

por plasticidad. Esto es tanto más cierto cuanto la rugosidad observada en las probetas de metal depositado es sensiblemente mayor provocando un cierre más acentuado en condiciones de amplitud constante [7]. Lógicamente, de haber sido este mecanismo el responsable del cierre de grieta tras la aplicación de las sobrecargas este hubiera sido mayor en el metal depositado contrariamente a lo observado experimentalmente.

4. CONCLUSIONES

- a.- El efecto ejercido por la aplicación de sobrecargas en la velocidad de crecimiento de grieta se acentúa conforme aumentan el número o magnitud de las mismas.
- b.- No se detecta ningún efecto de la orientación de las probetas sobre el número de ciclos necesario para la recuperación de la velocidad de crecimiento.
- c.- El número de ciclos necesario para esta recuperación de la velocidad primitiva es claramente menor en el metal depositado que en el metal base habiendo sido atribuido a su mayor límite elástico, apoyando la hipótesis de que el mecanismo operante es uno de cierre inducido por plasticidad.
- d.- La mayor rugosidad de las probetas de metal depositado, donde el efecto es menor, permite descartar la actuación de un mecanismo de cierre inducido por rugosidad como responsable del retraso en el crecimiento de grieta.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a I.Eizaguirre por la realización de las uniones soldadas necesarias para la obtención de las distintas probetas. Asimismo a la CICYT por la ayuda prestada al proyecto MAT92-0078 del cual se ha extraído el presente trabajo y al Gobierno Vasco por la colaboración aportada para su realización.

6. REFERENCIAS

- [1] Mc.Evily A.J. y Yang Z. "Fatigue Crack Growth. Retardation Mechanism after Single and Multiple Overloads". Fatigue 90. Vol 1, 23-26. Materials and Components Engineering Publications Ltd. (1990).
- [2] Taylor H., Kilpatrick I.M. y Jolley G.A. "Comparison of Overload and Maximum Cyclic Load Reduction Behaviour". Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures. Vol 3, 1367-1374. EMAS Ltd (1990).
- [3] Alexander D.J. y Knott J.F. "Fatigue Crack Retardation in Aluminium Alloys". Fatigue 87. Vol.1 395-406. EMAS Ltd. (1987).

- [4] Cheung-Mak S.K.P. y Le May I. "Observations of the Effect of Overloads on Fatigue Crack Growth". Fatigue 87. Vol.1 425-434. EMAS Ltd. (1987).
- [5] Ward-Close C.M. y Ritchie R.O. "On the Role of Crack Closure Mechanisms in Influencing Fatigue Crack Growth Following Tensile Overloads in a Titanium Alloy: Near Threshold versus Higher ΔK Behaviour". Mechanics of Fatigue Crack Closure. ASTM. STP 982, 93-111. ASTM (1988).
- [6] Mc.Evily A.J. y Yang Z. "On Crack Closure in Fatigue Crack Growth". Failure Analysis Theory and Practice. Vol.2, 1231-1248. EMAS Ltd. (1988).
- [7] Plaza L.M. e Irisarri A.M. "Crack Closure Behaviour of Titanium Grade 2 Weldments". Fatigue 93. Montreal (Canada). Mayo (1993).
- [8] ASTM B256. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloys Sheet Strip and Plate". ASTM Annual Book of Standards. Vol. 02.04.
- [9] Plaza L.M., Irisarri A.M., Eizaguirre I. y Santamaría F. "Estudio del Comportamiento a Fractura de Uniones Soldadas en Titanio de Fuerte espesor". Novenas Jornadas de Soldadura. Madrid. Marzo 1992.
- [10] Plaza L.M. e Irisarri A.M. "Fatigue Behaviour of a 12 mm Thick Titanium Grade 2 Plate". 8th International Conference on Fracture. Kiev. Ucrania (1993).
- [11] Belza E., Eizaguirre I., Santamaría F., Irisarri A.M., Plaza L.M. y Rekondo A. "Fatigue Crack Growth Behaviour of Titanium Grade 2 Weldments". Mac. Tec. 91, 293-298. IITT International. Paris (1991).
- [12] Plaza L.M. e Irisarri A.M. "Crack Closure Behaviour of 12 mm Thick Titanium Grade 2 Plates". Reliability and Structural Integrity of Advances Materials: Vol.1, 465-470. EMAS Ltd.(1992).

7. FIGURAS

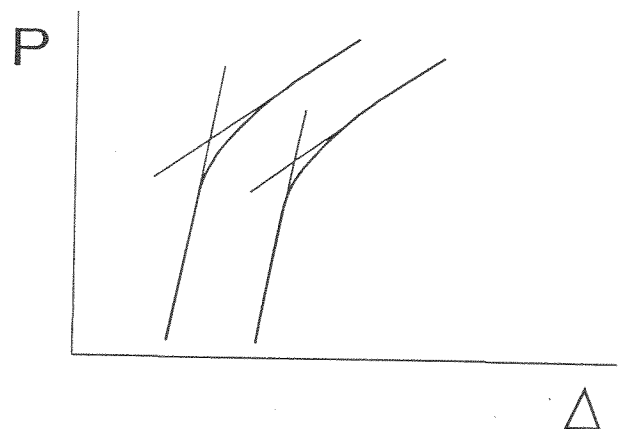


Fig.1. Gráfica Carga-Desplazamiento en Labios de Grieta.

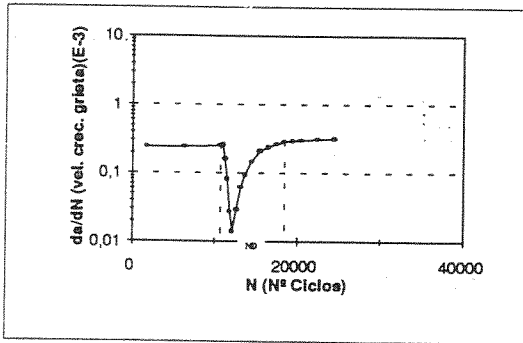


Fig.2. Gráfica Vel.Crec.Grieta (mm/ciclo)-Nº de Ciclos tras la aplicación de una sobrecarga. Ciclos de Retraso (N_D).

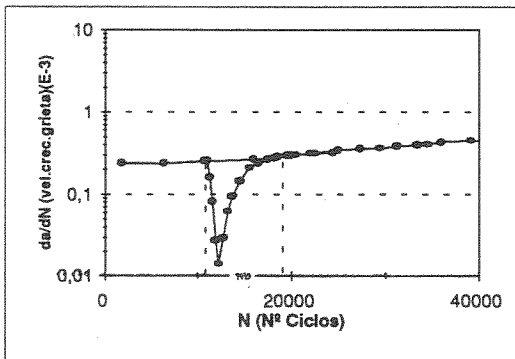


Fig.3. Gráfica a amplitud constante frente al efecto de la aplicación de una sobrecarga. Ciclos de Retraso (N_D).

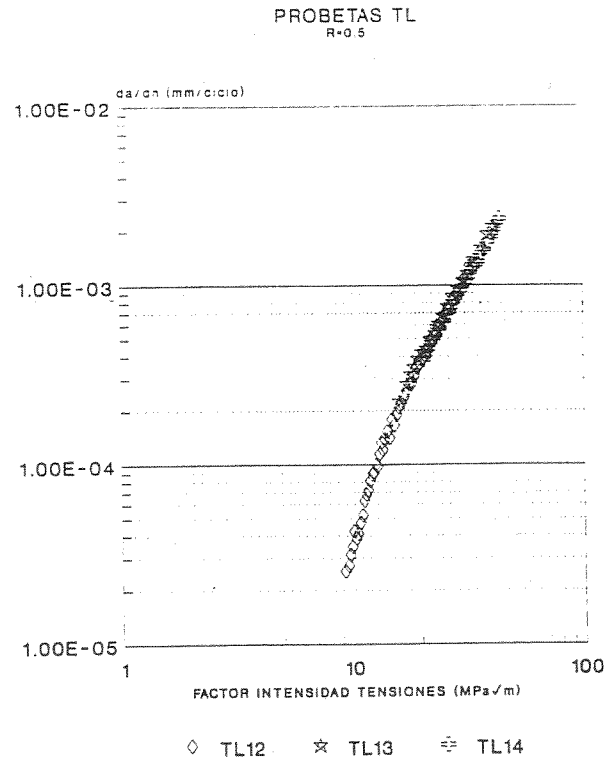


Fig.4. Concordancia de datos entre diferentes probetas.