

Soldadura aluminotérmica de carriles. Ensayo de fatiga

J. A. Pero-Sanz*; J. I. Verdeja**

*Escuela de Minas. Universidad Politécnica de Madrid

**Escuela de Minas. Universidad de Oviedo

Resumen

En este artículo se recogen las curvas de fatiga de carriles soldados aluminotérmicamente por dos procesos distintos. La diferencia de resultados obtenidos cabe achacarla más a la modalidad de ejecución que a la calidad metalúrgica de las uniones soldadas.

Palabras clave: Soldadura aluminotérmica, ensayos de fatiga, aceros perlíticos.

Abstract

This work summarizes the fatigue test curves carried out from aluminothermic welded rails by two different procedures. The disparity of experimental results claims more for the reliability of the welding procedure than for the metallurgical quality of the weld itself.

Key words: Aluminothermic weld, fatigue test, pearlitic steels.

1. Introducción

En artículos y trabajos anteriores (1-3) se ha descrito pormenorizadamente el proceso de soldadura aluminotérmica de carriles, con cala normal y ancha -24 y 48 mm- y diferentes modalidades de precalentamiento: normal y corto en sus variantes de oxipropano, propano/aire inducido y aire/gasolina. El proyecto de norma europea, actualmente en avanzada fase de elaboración -European Standard for aluminothermic welds in rails, referencia CEN/TC 256/SC 1/WG 4- contempla, para el control de calidad y homologación de un proceso de soldadura aluminotérmica, cualesquiera sean el grado y tipo de carril empleados, los siguientes aspectos: análisis químico; macro y microestructura del metal de aporte, zonas de fusión -con particular énfasis en su anchura, que ha de resultar superior o igual a 3 mm-, zonas afectadas por el calor y metal de base; perfil de durezas; ensayo de flexión estática y ensayo de fatiga. En Apéndices se recogen detalles relativos a la realización de ensayos no destructivos por gammagrafía, ultrasonidos, partículas magnéticas y utilización de líquidos penetrantes (4). Si nos fijamos más explícitamente en el carril UIC 60, grado 260, por tratarse del habitualmente empleado en vías de circulación de trenes con velocidades superiores a 200 Km/hora, los requerimientos antes citados se particularizarían del modo que sigue:

- *Análisis químico de la unión soldada:* 0,50-0,75 % C; 0,70-1,40 % Mn; < 0,9 % Si; < 0,035 % P; < 0,030 % S; < 0,20 % Cr; < 0,1 % Mo; < 0,60 % Al; 0,1 % V. Ello para calidad 260.

- *Macro y microestructura de la soldadura y zonas afectadas por el calor. Defectología:* distancia entre el extremo de carril y la línea de fusión superior o igual a 3 mm en cualquier punto vertical de la soldadura; estructuras 100 % perlíticas (ausencia de constituyentes de no equilibrio, bainita y martensita); ausencia de fisuras superficiales superiores a 2 mm, poros mayores de 3 mm e inclusiones de arena (escoria) de más de 10 mm de diámetro y 3 mm de profundidad; ningún defecto interno (porosidad, inclusiones, microrrechupes) de tamaño superior a 5 mm, en cabeza, alma y patín de la unión soldada.

- *Durezas:* el ensayo de dureza Brinell, verificado de acuerdo con lo establecido en la norma EN3 (ISO 6506), realizado en la línea central de soldadura, deberá dar cifras en el intervalo 280 ± 20 HBW, para la calidad 260 especificada. Los perfiles de durezas en las zonas afectadas por el calor se realizan por el método Vickers de acuerdo con lo especificado en la norma EN6 (ISO 6507) comenzando a partir de la línea de fusión y continuando hasta 20 mm en el interior del carril base, con su dureza normal (280 ± 20 HBW). Determinación de la anchura total de las zonas (menor o igual a 20, 30 y 40 mm, a requerimiento del usuario) y de la anchura de la zona térmicamente ablandada, de perlita globular, con dureza 10 HV inferior a la media (calidad 260).

- *Ensayos de flexión estática:* Realizado en las condiciones especificadas por la Euronorma para la recepción de conjuntos soldados aluminotérmicamente, el cupón ha de soportar una carga de 90 Tf con una flecha mínima de 9 mm; lo que equivale a una tensión máxima en tracción aplicada de 600 MPa, siempre trabajando con perfil UIC 60, calidad 260. La carga mínima de rotura requerida sería 113 Tf (750 MPa).

- *Ensayo de flexión dinámica (fatiga):* Realizado en condiciones de flexión repetida, acorde con la Euronorma, previsiblemente con una luz de 1.000 mm y una anchura del apoyo bifurcado de 150 mm, para el perfil UIC 60 (módulo resistente $377 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$) calidad 260; con un ciclado de carga entre 36 y 8 Tf -equivalente a $\sigma_{\max} = 220 \text{ MPa}$, $\sigma_{\min} = 50 \text{ MPa}$ -, deberá superar los 2.000.000 de ciclos sin rotura; o las condiciones -actualmente en debate- que la norma dicte.

2. Ensayos de fatiga

Es evidente que la inclusión de ensayos mecánicos, tanto estáticos –flexión en tres puntos– como dinámicos –ensayo de flexión repetida en cuatro puntos– focalizan la calidad de los procesos de soldadura aluminotérmica y su posibilidad de homologación por el organismo competente. El ensayo de flexión estática pone de manifiesto, la existencia de defectos «gruesos» de elaboración: defectos de piel, macro y micro-rechupes, segregaciones, así como la porosidad inherente al desprendimiento de gases durante la soldadura, provenientes tanto del molde como del acero aluminotérmico. El ensayo de flexión dinámica evidencia tanto los defectos «gruesos» –a mayor abundamiento– como los «finos», Figs. 1 y 2; y en este punto la norma europea endurecería el proceso de homologación de carriles soldados aluminotérmicamente; ya que algunas normas todavía en vigor –como la francesa– no contemplan la realización de ensayos de fatiga. Así, un pequeño defecto superficial, entalla o grieta de contracción, originados por tensiones residuales, cambio de volumen asociado a la solidificación, variaciones de la temperatura en servicio, etc.; la existencia de áreas ferritizadas (decarbura-das) en el contacto cordón-carril; una preparación incorrecta, previa al ensayo, del cordón, con introducción de rayas de mecanizado y zonas deformadas; en fin, la propia geometría del molde y por tanto de la unión soldada pueden ser la causa de que diferentes procesos de soldadura arrojen resultados, en el ensayo de fatiga, notoriamente distintos; y ello sin menosca-bo de que las soldaduras hayan sido correctamente ejecutadas y verifiquen, por otro lado, el resto de los requisitos –ante-



Fig. 1.–Rotura por fatiga de un carril soldado aluminotérmicamente. Superficie de fractura.

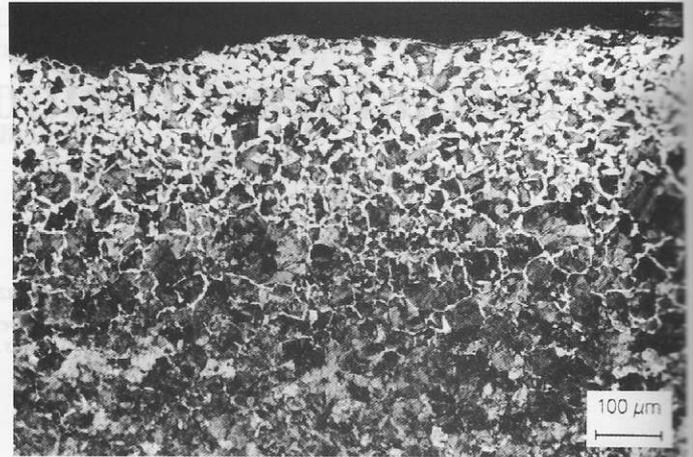


Fig. 2.–Área ferritizada y decarburada en la zona inicio de la rotura por fatiga del carril soldado aluminotérmicamente de la Fig. 1.

riormente descritos– exigidos por la Euronorma. En el ejemplo que sigue, se comparan las «bandas» de fatiga de dos procesos diferentes de soldadura aluminotérmica, generalmente denominados Procesos 1 y 2 respectivamente.

En efecto, el concepto de «banda» de fatiga –todo metalúrgico ha oído hablar de la «banda» de templabilidad de un acero, con la que guarda una cierta semejanza geométrica– reposa sobre el hecho, ampliamente demostrado por la experiencia, de la naturaleza estadística de la curva Wöhler –curva tensión aplicada/número de ciclos o curva S/N–, cuyos puntos se encuentran más o menos dispersos alrededor de una curva media, que es la que habitualmente se representa, Fig. 3 (5). Dispersión que se ajusta a una distribución normal o de Gauss y obedece a muy variados fenómenos, algunos de ellos ya citados: modo de ensayo, calidad superficial, estado metalúrgico y compacidad, fenómenos de corrosión, temperatura y tiempo, etc. Todo ello justifica la representación de la «banda» de Wöhler de los procesos referidos, Figs. 4 y 5, limitada por:

– una *curva límite inferior*, por debajo de la cual sólo se producirían un 16 % de roturas por fatiga.

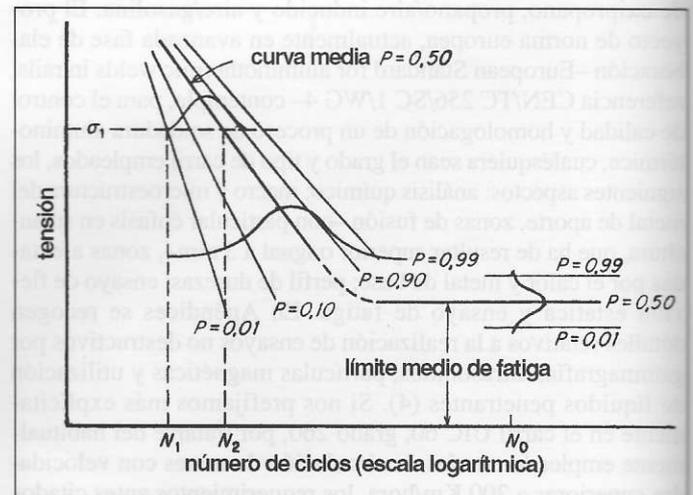


Fig. 3.–Curva genérica de Wöhler de un material férreo (5).

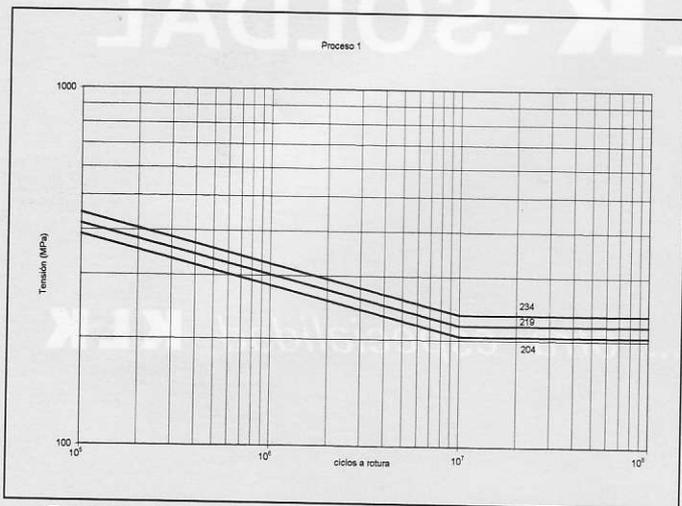


Fig. 4.-Banda de Wöhler del Proceso 1. Representación logarítmica.

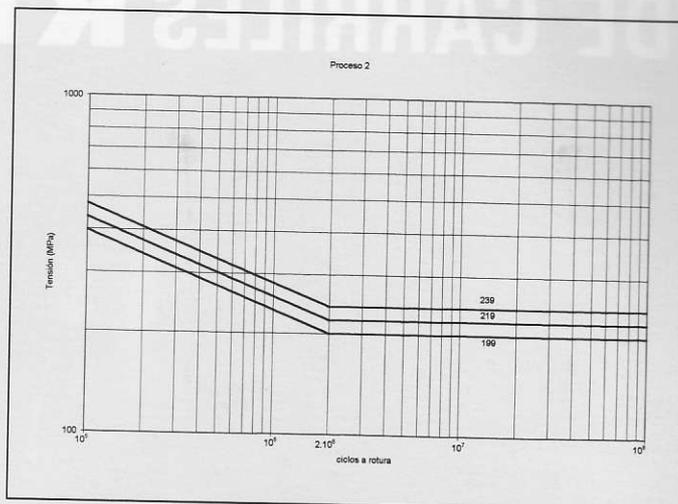


Fig. 5.-Banda de Wöhler del Proceso 2. Representación logarítmica.

– una *curva media*, curva de Wöhler propiamente dicha, con una probabilidad de fallo del 50 % para una tensión aplicada igual o superior al límite de fatiga «convencional» del material.

– una *curva límite superior*, por encima de la cual romperían un 84 % de las muestras ensayadas.

En otros términos, la «banda» de Wöhler así definida, abarcaría –para un determinado número de ciclos– el intervalo $\sigma \pm s$ en el que se ubican el 68 % de las roturas, siendo:

σ , la tensión media de rotura del material.

s , la desviación típica, obtenida por análisis de regresión lineal de los datos experimentales de la curva de Wöhler del material problema, empleando coordenadas logarítmicas (6).

Las ecuaciones que representan el comportamiento en fatiga de los procesos de soldadura aluminotérmica 1 y 2 son las que aparecen detalladas en la Tabla adjunta:

Proceso	Curva superior	Curva media	Curva inferior	σ_f (MPa)	N_f (ciclos)
1	$\sigma \cdot N^{0.14} = 10^{3.35}$	$\sigma \cdot N^{0.14} = 10^{3.32}$	$\sigma \cdot N^{0.14} = 10^{3.29}$	219	10^7
2	$\sigma \cdot N^{0.23} = 10^{3.83}$	$\sigma \cdot N^{0.23} = 10^{3.39}$	$\sigma \cdot N^{0.23} = 10^{3.15}$	219	$2 \cdot 10^6$

3. Conclusiones

– Los procesos de soldadura aluminotérmica 1 y 2 conducen a un mismo límite de fatiga, 219 MPa; pero uno de ellos se sitúa a $2 \cdot 10^6$ ciclos (Proceso 2), mientras que en el otro se alcanzan los 10^7 ciclos (Proceso 1): su durabilidad es cinco veces mayor.

– La dispersión estadística de la tensión límite de fatiga es menor en el Proceso 1 (219 ± 15 MPa) que en el Proceso 2 (219 ± 20 MPa); lo que aboga por una mayor fiabilidad del primer proceso de soldadura frente al segundo.

– En atención a los datos obtenidos, el Proceso 1 reúne mayores garantías que el Proceso 2, aunque ambos verifiquen la resistencia a fatiga inicialmente impuesta por la Euronorma. Ca-

be también pensar que el Proceso 2 es susceptible de mejora en su conjunto, modificando el dispositivo y condiciones de colada, geometría del molde y correcta ejecución del sistema de precalentamiento; por señalar los factores que, a nuestro juicio, son más importantes.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los Sres. S. Tamargo y J. M. Duart, del grupo de Empresas KLK Electromateriales, por la ejecución de soldaduras aluminotérmicas mediante procesos de marca KLK/SOLDAL. A los Dres. J. K. Milne y R. J. Allen, de Railtrack (U.K.), por los datos aportados sobre ensayos de fatiga de carriles soldados aluminotérmicamente. A los Dres. P. Gil y A. Alfonso por la ayuda recibida en el tratamiento estadístico de los resultados experimentales. Y a Dña. M. M. Cabeza, D. J. O. García y Sra. T. Iglesias por su valiosa colaboración en la preparación del texto y figuras.

Bibliografía

- GARCIA, J. O., HUERTA, M.^a A., VERDEJA, J. I.: *Soldadura aluminotérmica de carriles*. Revista de Minas, n.º 7, pp. 71-75 (1992).
- VERDEJA, J. I., PERO-SANZ, J. A.: *Soldadura aluminotérmica de carriles*. Tecnología KLK-SOLDAL. Revista de Minas, n.º 8, pp. 103-108 (1993).
- TAMARGO, S.: *Soldadura aluminotérmica de carril*. Jornadas Técnicas Ferroviarias Españolas-Argentinas (Buenos Aires, julio 1996).
- European standard for aluminothermic welding. Borrador enero 1996. Referencia CEN/TC 256/SC 1/WG 4.
- DIETER, G. E.: *Metalurgia Mecánica*, pp. 316-357, Edit. Aguilar (Madrid, 1967).
- MILNE, J. K., ALLEN, R. J.: Informe Railtrack a la Comisión de Redacción de la EN *European standard for aluminothermic welding* (abril y julio 1996).