

DUCTILIDAD Y TENACIDAD DE UN BORDE CORTADO POR PLASMA EN UNA CHAPA DE ACERO S460M DE 15 MM DE ESPESOR

J. Aldazabal^{1*}, A. Martín-Meizoso¹, S. Cicero², A. Klimpel³, A. Bannister⁴

¹CEIT y Tecnun (Universidad de Navarra) Manuel de Lardizábal, 15, 20018 San Sebastián, España.

²Universidad de Cantabria, Avda. de los Castros s/n, 39005 Santander, España.

³Politechnika Slaska - Sutil, Akademia 2^a, 44-100 Gliwice, Polonia

⁴Tata Steel, Swinden technology Centre, Moorgate, Rotherham, S60 3AR, Reino Unido

* E-mail: jaldazabal@ceit.es

RESUMEN

Los procesos de corte (y soldadura) son sin duda traumáticos para la microestructura de los materiales, de los que se deriva su comportamiento mecánico. Además esto afecta a la superficie, lo que agrava el problema, pues con frecuencia son las zonas que soportan unos mayores esfuerzos. En este trabajo se propone determinar si un corte por plasma mejora o no su comportamiento mecánico (fundamentalmente de cara a su comportamiento en fatiga bajo cargas alternadas).

Se presentan los resultados de la caracterización de un borde cortado por plasma en condiciones industriales. La chapa es de acero S460M de 15 mm de espesor. Se discute la rugosidad superficial introducida en la superficie del borde de corte, la metalografía de la Zona Afectada por el Calor/Corte, el perfil de durezas que se introduce en el material, el comportamiento mecánico del material a diferentes distancias medidas desde la superficie del corte, que se obtiene realizando ensayos de tracción de miniprobetas instrumentadas con bandas. También se presentan las medidas de tensiones residuales, obtenidas mediante difracción de rayos X y se compara el conjunto de resultados.

ABSTRACT

In general, thermal cutting processes of steel plates are considered to have an influence on microstructures and residual stresses distribution, which determines the mechanical properties of cut edges. It also affects the quality of the surface of cut edges, which complicates even more the problem, because in most cases the surface is subjected to the larger stresses. This work deals with the question of whether a plasma arc cutting process has influence on the mechanical behavior of cut edges of steel plate (basically from its future fatigue behavior under alternating loading conditions).

The paper presents the characterization results of straight plasma arc cut edges of steel plate grade S460M 15 mm thick, under standard industrial plasma arc cutting conditions. The surface roughness Rz5 of plasma arc cut edges is measured, the metallography of Cut-HAZ (Heat Affected Zone) of cut edges and hardness profiles versus distance from plasma cut edge surface are tested; the mechanical behavior of different CHAZ layers under the cut edge surface, obtained by testing of instrumented (with strain gauges) mini-tensile specimens. Also residual stresses distribution in CHAZ of cut edges is measured by X-ray diffraction and all results are compared.

PALABRAS CLAVE: Zona afectada por el corte, Corte con plasma, Acero, Miniprobetas.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de chapas de acero en elementos constructivos, estructuras, partes de maquinaria, etc. requiere, en la prácticamente la totalidad de los casos, del corte de estas chapas en partes más pequeñas que luego se unirán a otros elementos mediante uniones mecánicas o soldaduras. Hoy en día tenemos a nuestra disposición una plétora de técnicas de corte: cizallas, oxicorte, corte por laser, corte por chorro de plasma, por chorro de agua (con o sin partículas abrasivas), lanza térmica... pero todas estas técnicas de corte introducen modificaciones en las zonas próximas a los cortes: modifican su rugosidad superficial y al aportar calor

introducen modificaciones en la dureza y microestructura del material en las zonas próximas al corte, apareciendo nuevas microestructuras; en muchos casos, también introducen o modifican los perfiles de las tensiones residuales en las zonas próximas a la superficie del corte [1-5]. Para optimizar el uso del corte, y -en particular- sus posteriores prestaciones en aplicaciones bajo cargas alternadas (fatiga) [6-11], se plantea la cuestión de si es preferible dejar el borde de corte tal cual se produce o si fuera preferible eliminarlo, por ejemplo, mediante un amolado (como se especifica o recomienda en algunas normas de construcción). Pero este posterior amolado, a su vez introduce nuevas modificaciones en los bordes de corte.

Este es el objetivo que se propone dentro del proyecto europeo HIPERCUT. En este proyecto se analizan los resultados que se obtienen empleando diferentes técnicas de corte. Se estudian chapas de acero con espesores que van desde los 8 mm hasta los 25 mm; los grados y la resistencia mecánica de las chapas estudiadas varía entre S355M y S890Q. Las técnicas de corte que se estudian y comparan son chorro de plasma, haz láser, y oxicorte (oxi-acetileno). Este artículo presenta los resultados obtenidos con la técnica del corte con chorro de plasma en una acero (de alta resistencia y baja aleación) S460M.

2. MATERIALES Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

En este trabajo se resume la caracterización del borde de corte de una chapa de 15 mm de espesor de acero con una resistencia mecánica intermedia (S460M). Esta chapa se corta con un chorro de plasma, en las condiciones industriales estándar para el corte de estos espesores. Los parámetros de corte, para el equipo de corte empleado (Hypertherm 260) y para este espesor de chapa de acero son: velocidad de corte (2,2 m/minuto), corriente eléctrica, distancia entre la punta de la boquilla y la chapa, y presión del oxígeno que se usa durante el proceso de corte.

De la zona adyacente al corte se obtienen muestras para su estudio metalográfico, medidas de dureza y muestras para mecanizar mini-probetas de tracción. Las muestras metalográficas se engastan en una resina conductora (de la corriente eléctrica, Condufast). Después, la superficie en observación se pule con papeles de SiC hasta el grado 1200 y finalmente se pule con pasta de diamante de 0,6 micrómetros de tamaño, sobre un terciopelo, hasta conseguir un acabado especular. Las muestras pulidas se atacan con Nital al 2% durante 15 s, se aclaran con alcohol etílico y se secan bajo una corriente de aire caliente, antes de observarse en un microscopio óptico (Leica MEF-4).

Los perfiles de dureza se realizan usando un durómetro LECO M-400-G2, equipado con una punta piramidal Vickers. Las indentaciones se realizan con una carga de 4,93 N (0,5 kg).

Las miniprobetas de tracción se extraen mediante electro erosión con hilo (*WEDM, wire electro-discharge machining*). Se recortan 4 prismas, con forma de hueso de perro, a partir de la superficie del corte y con su eje perpendicular a la superficie del mismo. Estos prismas se sitúan a la mitad del espesor de la chapa o, lo que es lo mismo, en la zona central de la altura del corte, como muestra la Fig. 1.

Estos 4 prismas se rebanan en láminas de 300 μm de espesor, con una distancia entre cortes de 300 μm , que elimina el hilo de corte (véase la Fig. 2).

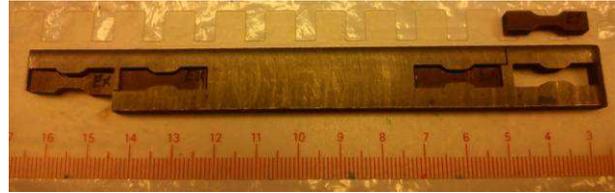


Fig. 1. Extracción de cuatro prismas (para la extracción de las miniprobetas de tracción), mediante electro erosión por hilo de la zona central del corte.



Fig. 2. Rebanado de uno de los prismas para obtener miniprobetas de tracción.

Los cortes iniciales de cada bloque se desplazan 150 μm entre unos y otros bloques, de modo que se obtiene una resolución de 150 micrómetros en profundidades o distancias al borde de corte.

Como se deduce de las Figs. 1 y 2, las miniprobetas tienen una orientación longitudinal (L) y sus caras son paralelas al borde de corte.

De acuerdo con la bibliografía [12], el corte mediante electroerosión por hilo (WEDM) introduce tensiones residuales que afectan a una profundidad de aproximadamente unos 80 micrómetros. Con el fin de eliminar -en lo posible- los efectos del WEDM, 50 micrómetros de cada lado de la miniprobeta de tracción se eliminan (mediante pulido con papel de lija de SiC de grado 1200 y un posterior pulido con pasta de diamante de 6 μm en un paño de terciopelo). Las miniprobetas no se mueven durante el pulido (en la máquina de pulido automático: Struers) para proporcionar un patrón de pulido longitudinal, paralela a la futura dirección de carga. El espesor final de las miniprobetas es de 200 μm (nominalmente. Luego se medirá en cada una de las probetas).

Excepcionalmente, en la primera miniprobeta, aquella que contiene la superficie del borde de corte, ésta no se

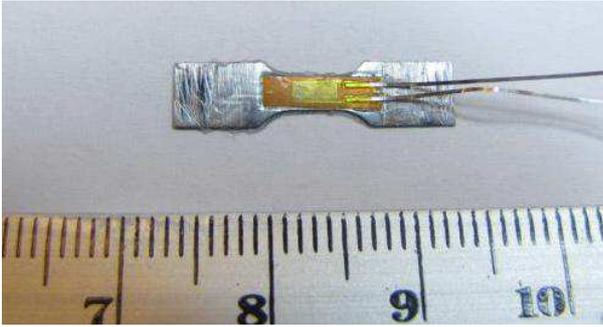


Fig. 3. Miniprobeta de tracción instrumentada con una banda extensométrica.

elimina mediante pulido, si no que se conserva. Esta primera mini-probeta de tracción sólo se pule por el lado interno (se realiza un pulido dos veces más severo, eliminado 100 μm por el lado interior, para que el espesor final sea también de aproximadamente 200 μm).

La Fig. 3 muestra una miniprobeta de tracción. Sus dimensiones básicas son 20 mm de longitud total, 5 mm de anchura total (2,5 mm de ancho y 3 mm de largo en la sección reducida) y 0,2 mm de espesor.

Para obtener mediciones precisas de la deformación, cada probeta se instrumenta con una banda extensométrica (HBM 1-LY11-3 / 120 con un 5% de deformación máxima), como se muestra en la Fig. 3. Se utiliza un amplificador San-Ei para registrar los alargamientos de la banda extensométrica. Los ensayos de tracción se realizan con una velocidad de desplazamiento del actuador de 0,1 mm /minuto. Para las deformaciones superiores al 5%, se utilizan los registros de posición del pistón (a partir de la correlación entre la posición del actuador y las medidas anteriores de la banda extensométrica). La carga que soporta la banda extensométrica se mide en un ensayo independiente en función de la deformación ingenieril. Estas cargas -no despreciables- se restan, a las medidas en los ensayos, antes del procesamiento posterior de los resultados.

Los ensayos de tracción se realizan en una máquina de electro-mecánica (Instron Mini 44). Esta máquina de ensayos está equipada con una célula de carga de ± 500 N. Los extremos de la miniprobetas se introducen en dos ranuras mecanizadas en los extremos de dos pernos. Estas ranuras tienen 300 μm de espesor. Las cabezas de las miniprobetas se pegan con un adhesivo de cianoacrilato (Loctite); la capilaridad hace el resto.

Se utiliza un equipo de difracción de rayos X para la medida de las tensiones residuales, en la superficie del borde de corte de la chapa de 15 mm, tanto en dirección longitudinal, como a través del espesor. Se cortan muestras paralelepípedicas de $8 \times 10 \times 35$ mm (mediante WEDM) en la mitad del espesor de la chapa. Estos cupones se limpian en una solución de 500 mm³

de CIH y 500 mm³ de agua destilada, durante 20 minutos, a temperatura ambiente. Las medidas se realizaron en un difractómetro Philips (X'Pert), con los siguientes parámetros: material de ánodo Cr ($K\text{-}\alpha_2 = 2,2936663 \text{ \AA}$), voltaje: 40 kV, corriente: 40 mA, 2θ rango de exploración: $144,1 \sim 166,0^\circ$ ($0,3^\circ/\text{paso}$), ψ rango de exploración: $-60,00 \sim 60,00^\circ$ ($7,76^\circ/\text{paso}$), tiempo por paso: 12,05 s.

Para retirar capas delgadas se utiliza un pulido electro-lítico y así medir las tensiones residuales que quedan después de la eliminación de capas superficiales. Como medio electro-lítico se emplea ácido perclórico con un 10% de etanol, el voltaje es de 14 V. Este procedimiento: electro-pulido y difracción de rayos X se repite cuatro veces, hasta alcanzar una profundidad de 700 μm , medidas a partir de la superficie del corte. Después, las tensiones se deconvolucionan matemáticamente, mediante un programa de ordenador, para obtener las tensiones residuales que realmente había (antes de la eliminación de estas capas superficiales).

3. RESULTADOS

3.1. Metalografía

La Fig. 4 muestra la sección metalográfica (ya atacada) de la Zona-Afectada por el Corte (ZAC). Se observa un redondeo en la zona superior (entrada del chorro) del corte y una reducción de espesor (de 2,0 mm). La ZAC es muy delgada, en comparación con las obtenidas por otros procedimientos de corte con menores densidades de energía, por ejemplo, mediante oxicrote [13]. El lado de salida muestra una extensión de la ZAC muy similar que a la que se puede observar en el lado de entrada y en el centro del espesor del borde de corte. De la misma manera que en un proceso de soldadura, el calor generado durante el corte produce transformaciones de fase y el crecimiento del grano de material de la matriz subyacente, como muestra la Fig. 5.

En la región más cercana al borde de corte, se observan capas de martensita y bainita. A una distancia de unas 200 μm del borde de corte se observa ferrita poligonal. Aproximadamente a unas 400 μm los granos de ferrita son más grandes y más allá de las 600 μm se observa perlita y aún mayores granos de ferrita poligonal; esta última microestructura corresponde al material base, no afectado por el corte (un acero hipoeutectoide, con bandas de perlita y ferrita).

3.2. Microdurezas

La Fig. 6 muestra los perfiles de dureza Vickers (0,5 kg, HV05) medidos en la parte superior (a 0,5 y 2,5 mm de la superficie superior de la chapa), en la mitad del espesor y en la parte inferior (a 0,5 y 2,5 mm por encima de la superficie inferior de la chapa) del borde

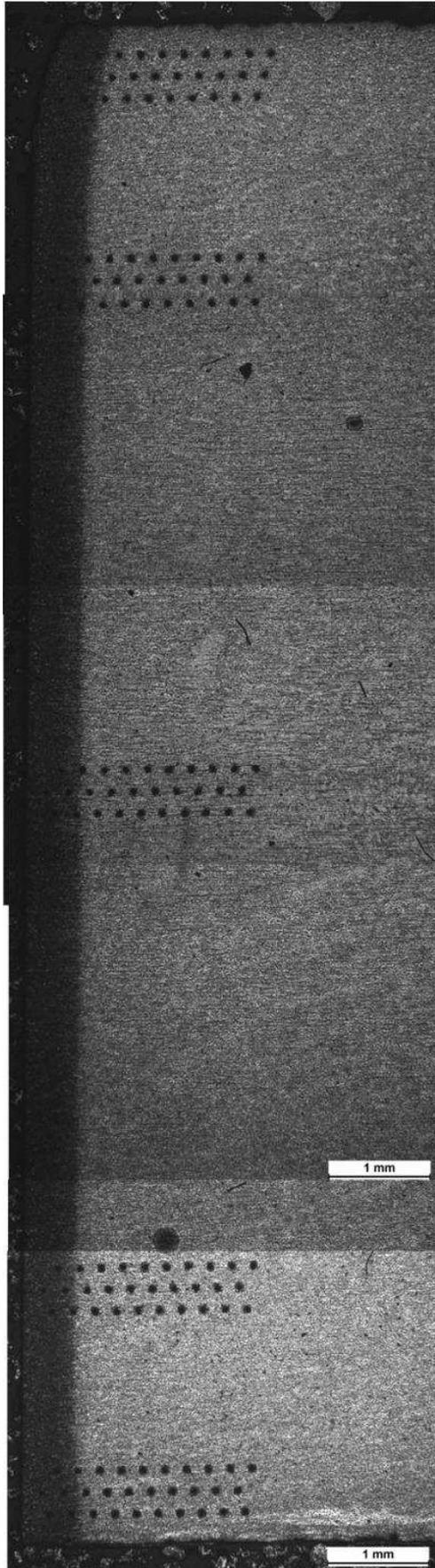


Fig. 4. Micrografía óptica de la ZAC, atacada con Nital al 2%. Las indentaciones Vickers son visibles.

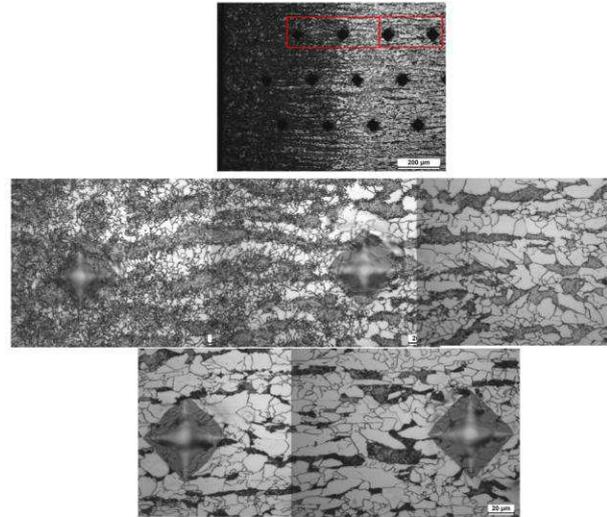


Fig. 5. Detalle de las microestructuras próximas al borde cortado por plasma.

de corte, en función de la distancia al borde de corte. Con el propósito de obtener perfiles de dureza muy detallados, se realizan indentaciones de 0,5 kg (4,91 N) en lugar de las más habituales de 1 kg (9,81 N). Las indentaciones de medio kilogramo son más pequeñas y pueden situarse más cerca las unas de las otras y de la superficie del corte. A cada altura se realizan tres líneas de indentaciones, con un desplazamiento entre ellas, con el mismo propósito: obtener en mayor detalle la evolución de la dureza en la CAZ.

Las medidas de microdureza proporcionan resultados muy similares en la parte superior, media e inferior de la sección cortada. Esto se relaciona con una CAZ bastante uniforme, como se revela en las imágenes incluidas en la Fig. 4. El efecto del corte por plasma desaparece a una distancia de menos de 0,6 mm del borde cortado, tanto en su zona superior, como media e inferior. La norma Europea EN 1090-2 [14] fija un límite de 380 kg/mm² para la dureza Vickers después del corte. Las microdurezas medidas próximas a la superficie superan ligeramente este límite en una fina capa, con una profundidad de unos 350 μm (La EN

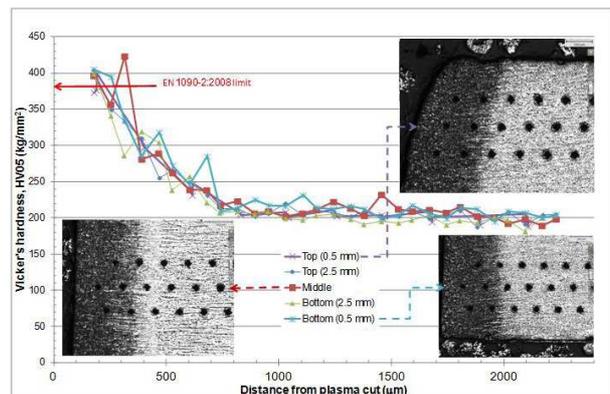


Fig. 6. Perfiles de dureza frente a la distancia al corte.

1090-2 [14] específica Vickers con 1 kg de carga y aquí se presentan resultados obtenidos con solo 0,5 kg). El problema con una superficie de corte muy dura es su agrietando en los procesos posteriores de doblado. Se han realizado ensayos de doblado de la chapa, con un radio de doblado de dos veces el espesor de la chapa. Todas las muestras se doblaron 180° sin grietas, incluyendo probetas que tenían toda la superficie del borde de corte en el lado de tensión.

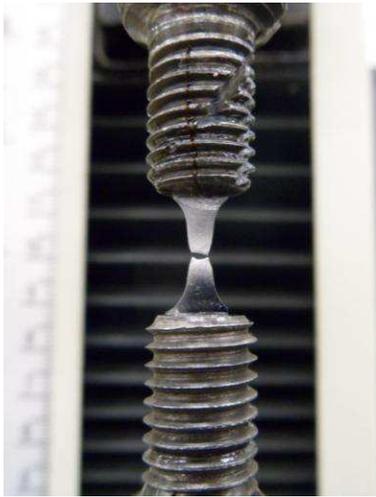


Fig. 7. Mini probeta rota a tracción. Se observa la estricción y la fractura dúctil.

3.3 Ensayos de tracción

La Fig. 7 muestra la fractura (dúctil) por tracción, típica de una miniprobeta, tras la estricción. La Fig. 8 resume los resultados obtenidos en los ensayos de tracción. La tensión ingenieril se representa frente a la deformación (ingenieril) en función de la distancia al corte de plasma, para miniprobetas extraídas del centro del espesor del corte. Se puede observar que cuanto más cercanos al corte más grandes son los parámetros de resistencia y menor la ductilidad. Las curvas tensión-deformación se estabilizan a una distancia de aprox.

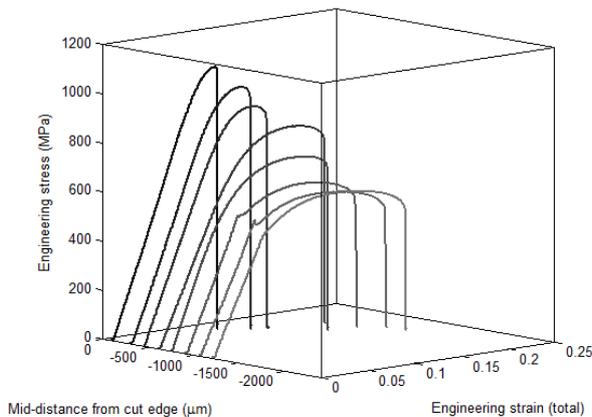


Fig. 8. Registros de tensión frente a la deformación, en función de la distancia al corte por plasma.

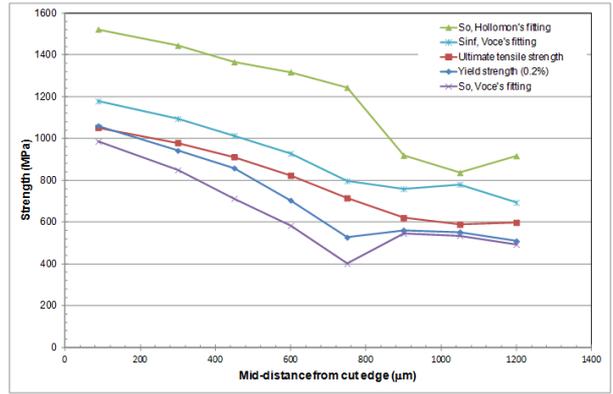


Fig. 9. Evolución de los parámetros de resistencia mecánica en función de la distancia al corte.

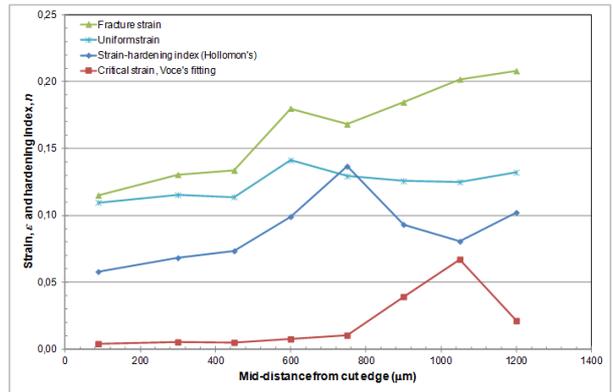


Fig. 10. Evolución de las deformaciones e índice de endurecimiento por deformación, en función de la distancia al borde cortado por plasma.

1000 μm. Esto concuerda con las medidas de microdurezas hechas en el centro del borde de corte.

La Fig. 9 representa la evolución de los parámetros mecánicos de resistencia (límite elástico, carga de rotura...) frente a la distancia al corte con plasma, para miniprobetas extraídas de la mitad del espesor del corte. La Fig. 10 muestra la evolución de la deformación uniforme (hasta estricción), deformación de fractura e índice de endurecimiento por deformación, frente a la distancia al corte por plasma; igualmente, de probetas situadas en el centro del espesor del corte.

3.4 Tensiones residuales

La Fig. 11 muestra las tensiones residuales en la dirección longitudinal (L) y a través del espesor (T) obtenidas a partir de la difracción de rayos X y después de su deconvolución. El corte con plasma genera sobre la superficie del corte unas grandes compresiones en ambas direcciones (L y T). Esta compresión residual se extiende hasta una distancia de aproximadamente 700 μm en el material subyacente, situado bajo el corte.

El valor de estas tensiones compresivas son del orden del límite elástico del material y pueden jugar un papel

clave en el comportamiento a la fatiga de los bordes de corte (por ejemplo, retrasar la iniciación de grietas y, por tanto, aumentar la vida de la fatiga), aunque esto también depende de otros parámetros como la rugosidad de la superficie y las características microestructurales en las zonas subyacentes al corte. Se están realizando ensayos de fatiga de probetas con los bordes cortados por plasma, con el fin de aclarar si los cortes por plasma mejoran el comportamiento a la fatiga, en comparación, por ejemplo, con los cortes realizados por oxicorte.

4. CONCLUSIONES

La ZAC generada por un corte con plasma es bastante fina y uniforme a través de todo el espesor del corte (800 µm). Estos resultados concuerdan con las observaciones metalográficas y las medidas de microdurezas.

La dureza en la superficie del borde del corte puede ser ligeramente superior al límite fijado en la norma EN 1090-2 [14], pero la chapa se dobla 180° sin agrietarse.

Se han obtenido curvas de flujo (tensión frente a deformación) de diferentes láminas extraídas a diferentes profundidades, bajo el corte. Se ha realizado ensayando miniprobetas de tracción, extraídas mediante WEDM, e instrumentadas con bandas extensométricas.

El límite elástico y la carga de rotura cambian con la distancia al corte. En las zonas más próxima al corte se miden valores que pueden ser un 100% mayores que los que presenta el material base.

Cuanto mayor es la resistencia mecánica, tanto menor es la ductilidad y la resiliencia. Obviamente, sus valores están relacionados con las microestructuras formadas en la ZAC.

El corte por plasma introduce grandes compresiones residuales, hasta profundidades de aproximadamente 700 µm. Estas compresiones resultarán beneficiosas en estructuras solicitadas con cargas alternadas.

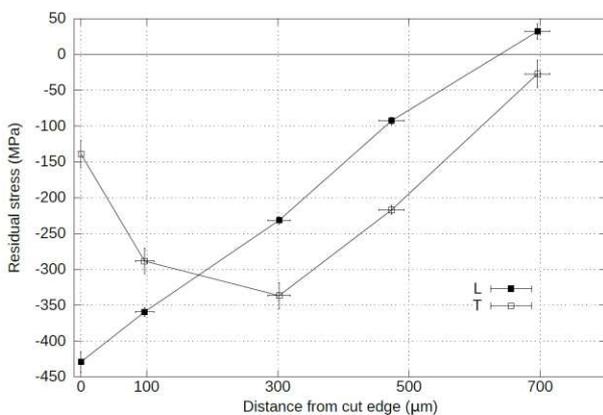


Fig. 11. Distribución de las tensiones residuales en función de la distancia al corte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida de la Unión Europea a través del proyecto HIPERCUT (RFSC-CT-2012-00027).

REFERENCIAS

- [1] D.J. Tomas, Characterisation of steel cut edges for improved fatigue property data estimations and enhanced CAE durability. Ph.D. Thesis. Swansea University, UK (2011).
- [2] BS EN ISO 9013: 2002, Thermal Cutting – Classification of thermal cuts – Geometrical products specification and quality tolerances (2004).
- [3] The Steel Construction Institute, Guidance Notes on best practice in steel bridge construction. P185, Fifth issue, Steel Bridge Group (2010).
- [4] I. Kirkpatrick, Variety of cutting processes spoil fabricators for choice, *Welding & Metal Fabrication* **62**, 5 (1994) 11-12.
- [5] M. Avila, Which Metal-Cutting Process Is Best for Your Application, *Welding Journal* (Oct. 2012) 32-36.
- [6] F. Goldber, Influence of thermal cutting and its quality on the fatigue strength of steel, *Welding Journal* **52**, 9 (1973) 392-404.
- [7] R. Plecki, R. Yeske, C. Alstetter and F.V. Lawrence Jr., Fatigue resistance of oxygen cut steel. *Welding Journal* **56**, 8 (1977) 225-230.
- [8] N.-J. Ho, F.V. Lawrence and C.J. Alstetter, The fatigue resistance of plasma- and oxygen-cut steel, *Welding Research Supplement* (Nov. 1981) 231-236.
- [9] E. Piraprez, Fatigue strength of flame-cut plates, Fatigue of Steel and Concrete Structures, IABSE Reports 37. Zurich, Switzerland (1982) 23-26.
- [10] W.E. Wood, Heat-Affected Zone Studies of Thermally cut Structural Steels, US Department of Transportation Federal Highway Administration Report FHWA-RD-93-O 15 (Dec. 1994).
- [11] I. Kaufmann, W. Schonherr and C.M. Sonsino, Fatigue strength of high-strength fine-grained structural steel in the flame cut condition. *Schweissen u. Schneiden* **3** (1995) E46-E51.
- [12] V. García Navas, I. Ferreres, J.A. Marañón, C. García-Rosales, J. Gil Sevillano, Electro-discharge machining (EDM) versus hard turning and grinding—Comparison of residual stresses and surface integrity generated in AISI O1 tool steel, *J. of Mater. Process. Techn.* (2007).
- [13] A. Martín-Meizoso, J. Aldazabal, J.L. Pedrejón, S. Moreno, Caracterización de la Zona Afectada por un Oxicorte, *Anales de Mecánica de la Fractura* **31** (2014) 595-600.
- [14] European Standard: EN 1090-2:2011+A1, Execution of steel structures and aluminium structures. Part 2: Technical requirements for steel structures. Oct. 2011.