

Propiedades mecánicas de las uniones por láser de aceros inoxidable dúplex^(*)

V. Amigó*, V. Bonache*, L. Teruel* y A. Vicente*

Resumen

Las uniones soldadas de aceros inoxidable siempre presentan problemas por las modificaciones microestructurales que suceden en la zona afectada por el calor. Particularmente, los aceros inoxidable dúplex presentan cambios microestructurales muy importantes al solidificar el cordón y formar estructuras, fundamentalmente ferríticas, con formación de austenita en borde de grano. Estas modificaciones microestructurales, junto a las que suceden en la ZAC, son las que justifican las propiedades mecánicas de la unión y fundamentalmente las de plasticidad. Y todo ello en función de las condiciones de procesado. En este trabajo se presenta la influencia de la velocidad de soldeo en las propiedades a tracción de uniones soldadas por láser de chapas de acero inoxidable dúplex. La microestructura de los cordones obtenidos y de la zona afectada por el calor se ha evaluado mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, y se han obtenido diferentes perfiles de microdureza que han permitido evaluar las modificaciones en las propiedades mecánicas de la zona de afección térmica.

Palabras clave

Aceros inoxidable dúplex. Soldadura por haz láser. Láser Nd:YAG. Propiedades mecánicas. Velocidad de soldeo.

Mechanical properties of duplex stainless steels laser joints

Abstract

The welded joints of stainless steels always present problems for the microstructural modifications that occur in the heat affected zone. Particularly, duplex stainless steels present very important changes when the weld pool solidifies forming fundamentally ferritic structures with some austenite in grain boundaries. These microstructural modifications, and those which occur in the HAZ, justify the mechanical properties of the joint and mainly those of plasticity, being all of them influenced by the processing conditions. In this work the influence of the laser welding speed on the tensile behaviour of duplex stainless steel welded joints is presented. The microstructure of the obtained seams and of the heat affected zone will be evaluated by means of optic and scanning electron microscopy. Also, different microhardness profiles have been obtained to evaluate the modifications in the mechanical properties both in the seam and the zone of thermal affection.

Keywords

Duplex stainless steel. Laser beam welding. Nd:YAG laser. Mechanical properties. Welding speed.

1. INTRODUCCIÓN

La familia de los aceros inoxidable dúplex se encuentra a medio camino entre los aceros inoxidable austeníticos y los ferríticos y combina los mejores aspectos de ambos. Debido a la combinación de excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, los aceros inoxidable dúplex se usan en una gama amplia de aplicaciones como las

industrias químicas, petroquímicas, alimenticias, del papel, farmacéuticas, marinas y en muchos otros campos^[1 y 2].

Los aceros inoxidable dúplex se han convertido, actualmente, en los principales competidores de los aceros inoxidable austeníticos por la combinación de un alto límite elástico y tenacidad junto con una excelente resistencia a la corrosión en el rango de temperatura -50 +250 °C, que permite el

(*) Trabajo recibido el día 17 de septiembre de 2004 y aceptado en su forma final el día 14 de enero de 2005.

(*) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n, 46022-Valencia-España.

uso de menores espesores y por consiguiente un ahorro de material y un menor costo^[3 y 4].

Los aceros inoxidable dúplex contienen una microestructura formada por un 35-75% de ferrita y el resto austenita^[5], aunque presentan propiedades óptimas cuando sus ratios de volumen austenita:ferrita son aproximadamente 1:1^[6 y 7]. Este equilibrio depende de la composición química y de las condiciones termo-mecánicas de procesamiento^[8], por lo que resulta esencial controlarlo durante los procesos de fabricación y durante el servicio^[9].

A pesar de su sofisticada microestructura los aceros inoxidable dúplex pueden soldarse mediante procesos de soldadura convencionales y su problemática más importante viene dada por la microestructura bifásica que lo conforma, junto con la precipitación de fases intermetálicas que hacen la práctica de soldeo algo más compleja que la de los aceros inoxidable austeníticos^[10].

Las composiciones dúplex, generalmente, solidifican como ferrita y la austenita se forma por nucleación durante el enfriamiento en estado sólido (1.300-800 °C), por lo que las altas velocidades de enfriamiento asociadas con la soldadura alteran el equilibrio de fases produciendo una ferritización del material soldado^[11]. Otro problema asociado con la soldadura de aceros inoxidable dúplex es la precipitación, durante el enfriamiento de fases intermetálicas tales como fase σ , fase χ , Cr_{23}C_6 , Cr_2N , especialmente en la zona afectada por el calor^[12 y 13], lo que produce una gran disminución de la tenacidad, afectando también a la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas^[14]. Estos problemas pueden evitarse mediante la adición de elementos estabilizadores de la austenita, siendo usual el empleo de materiales de aporte sobrealeados con un 2-4 % más de níquel que el metal base. La relación ferrita/austenita también depende de la entrada de calor en la soldadura, puesto que ésta última controla la velocidad de enfriamiento γ , por tanto, la transformación de ferrita a austenita basada en la difusión. Por lo que la entrada de calor ha de ser suficientemente alta para promover dicha transformación, obteniendo un equilibrio de fases favorable pero lo bastante baja como para evitar la precipitación de las fases intermetálicas debidas a la baja velocidad de enfriamiento^[15 y 16]. Otra consideración a tener en cuenta, a la hora de soldar este material, es que no son recomendables los tratamientos de precalentamiento ni postcalentamiento porque promueven la precipitación de fases no deseadas^[5 y 17].

Varios trabajos publicados presentan un marco preliminar de datos que subrayan la buena soldabi-

lidad de los aceros inoxidable dúplex por haz láser^[18 y 19]. La soldadura láser es un proceso de alta densidad de energía y baja entrada de calor, de 5 a 8 veces menor que en métodos de soldadura convencionales como soldadura por arco sumergido^[20 y 21]. Esto, induce ciclos térmicos muy rápidos en el material con velocidades de calentamiento del orden de 10^4 °C/s^[22] y, consecuentemente, rápidas velocidades de enfriamiento que producen cordones de soldadura con una elevada relación penetración/anchura, zonas afectadas por el calor mínimas, reducción de las tensiones residuales y de la distorsión térmica. Otras ventajas que hacen atractiva esta técnica son su alta capacidad de producción, repetibilidad y capacidad de automatización^[23].

Este trabajo presenta la influencia de los parámetros de soldeo en las modificaciones microestructurales y en el comportamiento mecánico de las uniones soldadas. En él, se pretende determinar la evolución microestructural de la zona fundida y de la zona afectada por el calor, lo que definirá las propiedades mecánicas de las uniones soldadas. Dicho comportamiento mecánico se evalúa mediante ensayos de tracción sobre probetas soldadas y barridos de microdureza de la zona afectada térmicamente.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El material empleado en la investigación han sido chapas laminadas de 2 mm de espesor de acero inoxidable dúplex NIROSTA 4462 de Thyssen (EN X 2CrNiMoN 22 5 3), cuya composición básica es 0,03 % C, 1,00 % Si, <2,00 % Mn, 22,00 % Cr, 5,50 % Ni, 3,00 % Mo y 0,20 % N; y barras de acero dúplex pulvimetalúrgico de composición 50 % 316L-50 % 434 cuyo proceso de sinterización consiste en un calentamiento a 5 °C/min hasta temperatura de 1.250 °C, mantenimiento durante 30 min y enfriamiento hasta unos 700 °C a una velocidad de 5 °C/min. La microestructura básica de ambos materiales se muestra en la figura 1.

Las uniones soldadas se han realizado, sin material de aporte, irradiando las juntas a testa mediante un láser de Nd-YAG de 1.000 W de potencia máxima, emitiendo en una longitud de onda de 1.064 nm (infrarrojo cercano) que dispone de modos de emisión continua y pulsada. Se utiliza un cabezal coaxial de aporte de argón, que tiene la doble función de proteger la óptica del cabezal de las emisiones de partículas y gases del material que se está uniando, así como proveer a la zona de unión de

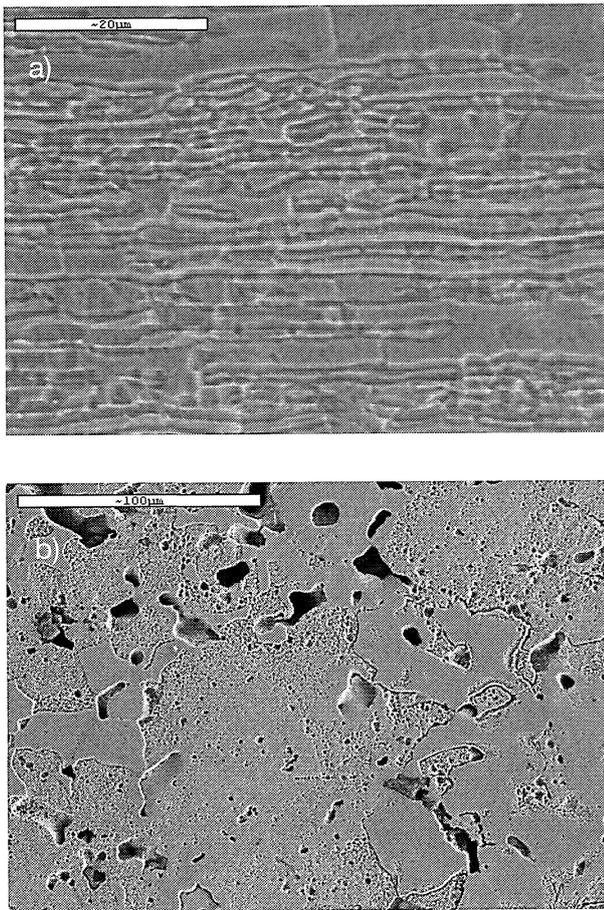


Figura 1. a) Microestructura del acero inoxidable dúplex laminado obtenida con SEM tras el ataque con Murakami. b) Microestructura del acero inoxidable dúplex sinterizado obtenida con SEM tras el ataque con Murakami.

Figure 1. a) Mill duplex stainless steel microstructure after etching with Murakami obtained with SEM. b) Microstructure of Sintered duplex stainless steel after etching with Murakami obtained with SEM.

una atmósfera protectora libre de oxígeno. Las soldaduras se han realizado en modo continuo, a la potencia máxima del láser y con un desenfoque de 15 mm. Las velocidades de avance de la mesa, tras verificar las condiciones idóneas para conseguir una adecuada penetración del cordón, con un mínimo descuelgue han sido de 300 y 400 mm/min para el material de forja y de 200 y 250 mm/min para el material pulvimetalúrgico.

Del acero de forja, se cortan por láser placas de 140 × 60 mm en el sentido transversal de laminación, de forma que al soldar el cordón quede a 90° del sentido de laminación. Las probetas de tracción se obtienen mediante corte por láser.

La caracterización mecánica de las uniones soldadas se ha realizado mediante ensayos de tracción con un equipo Instron modelo 4204 de 50kN de

carga máxima y ensayos de microdureza, con un equipo Matsuzawa MHT2 trabajando con una carga de 200 gf durante 20 s y en el que se han obtenido distintos barridos a lo largo de la zona de afectación térmica.

Las observaciones macroscópicas de los cordones se han realizado mediante un microscopio estereoscópico Nikon SMZ800. El análisis se ha completado con un estudio microestructural, en el que se han empleado técnicas metalográficas convencionales en cortes transversales a la soldadura. Las muestras han sido atacadas con Murakami (10 g permanganato potásico, 10 g KOH y 100 ml de H₂O, a 60 °C, durante 10 min para el material laminado y, aproximadamente, unos 40 min para el acero pulvimetalúrgico) y observadas mediante microscopía óptica (Nikon Microphot FX) y microscopía electrónica de barrido (JEOL JSM 6300).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Microestructura

En ambos materiales se ha observado una estructura de solidificación fundamentalmente ferrítica por la alteración del equilibrio debido a las altas velocidades de enfriamiento, como se muestra en la figura 2. La fase ferrítica presenta una estructura de granos equiaxiales en el centro de la zona de fusión y granos columnares engrosados, típicos del crecimiento epitaxial y competitivo. La austenita precipita de forma incipiente, preferentemente en los bordes de grano de la ferrita, como austenita alotriomorfa que sirve para la nucleación de austenita Widmanstätten y, en el interior de los granos de ferrita, en forma acicular. La ZAC se caracteriza por tener una anchura mínima y sólo se aprecia un engrosamiento de los granos de ferrita con disolución aparente de austenita. Con las técnicas empleadas en el análisis microestructural no se puede confirmar la presencia de compuestos intermetálicos que constituyen el principal inconveniente en la soldadura de los aceros inoxidables dúplex.

3.2. Comportamiento a tracción

El efecto de la soldadura láser en el comportamiento a tracción del material forjado se observa en la figura 3.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla I donde se observa que las transformaciones microestructurales en la zona fundida y en la ZAC

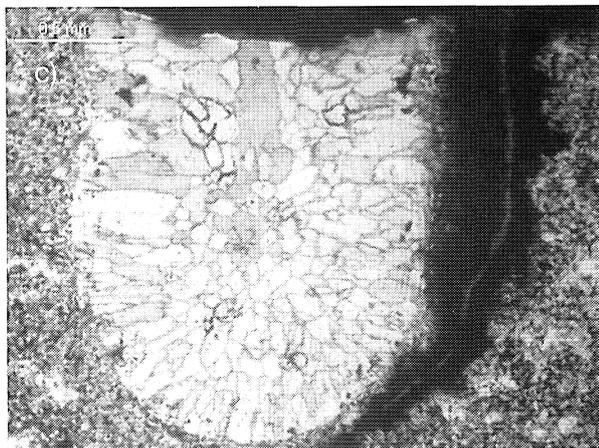
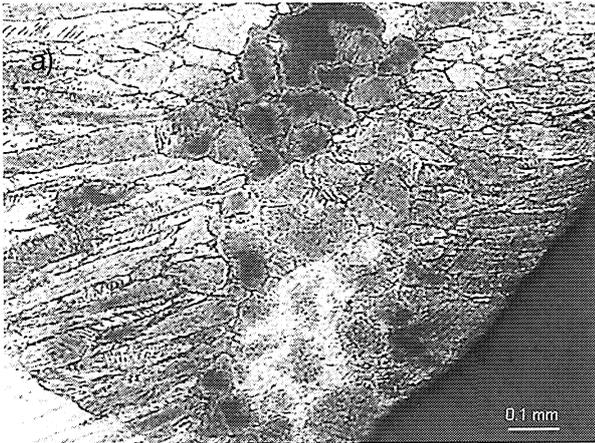


Figura 2. a) Micrografía del acero inoxidable dúplex laminado soldado a 300 mm/min obtenida con microscopía óptica tras ataque con Murakami. b) Detalle ZAC de la Fig 2(a). c) Micrografía del acero inoxidable dúplex sinterizado soldado a 200 mm/min obtenida con microscopía óptica tras ataque con Murakami.

Figure 2. a) Micrograph of Mill duplex stainless steel welded at 300 mm/min after etching with Murakami obtained with optical microscopy. b) Detail HAZ of Fig 2(a). c) Micrograph of sintered duplex stainless steel welded at 200 mm/min after etching with Murakami obtained with optical microscopy.

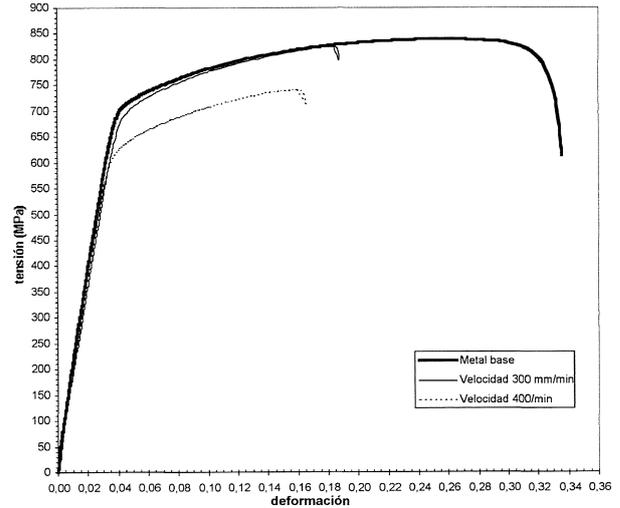


Figura 3. Influencia de la velocidad de soldeo en el comportamiento a tracción de aceros dúplex laminados.

Figure 3. Influence of welding speed in the tensile behaviour of mill duplex stainless steel.

Tabla I. Resultados de ensayos de tracción de aceros inoxidables dúplex laminados

Table I. Tensile test results of mill duplex stainless steels

	Límite elástico (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Alargamiento a rotura (%)	Estricción
Metal base	681	840	27,4	44,1
Velocidad 300 mm/min	567	763	12,6	8,6
Velocidad 400 mm/min	512	745	8,3	10,2

apenas alteran las buenas propiedades resistentes de la unión, mientras que los parámetros plásticos sufren pérdidas significativas.

Se aprecia una pérdida de resistencia máxima, de un 9,2 % y de un 11,3 %, una disminución del límite elástico del 16,7 % y del 24,8 % y una reducción del alargamiento a rotura del 54 % y del 69,7 %, para velocidades de soldeo de 300 y 400 mm/min, respectivamente.

La rotura de las uniones soldadas se produce por la zona de fusión (Fig. 4 a). La micrografía de la figura 4 b) muestra que, a pesar de la pérdida de plasticidad a causa de la soldadura, las fracturas presentan importante ductilidad que se manifiesta por la aparición de cavernas de deformación típicas de rotura dúctil.

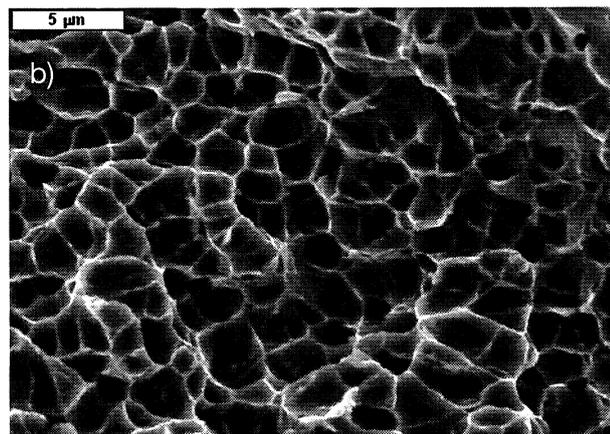
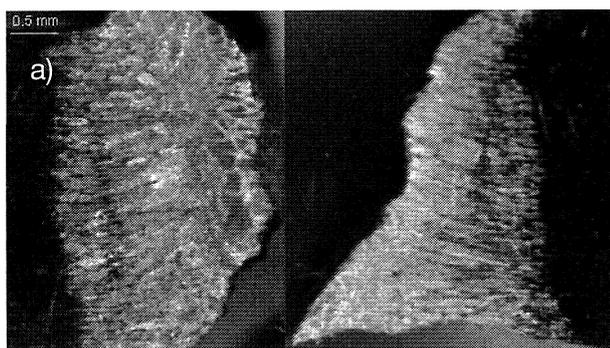


Figura 4. a) Vista transversal de la fractura de de acero dúplex laminado soldado a 300 mm/min obtenida con microscopía estereoscópica tras ataque con murakami. b) Micrografía de la fractura de acero dúplex laminado soldado a 300 mm/min obtenida con SEM.

Figure 4. a) Transverse view of the mill duplex stainless steel fracture welded at 300 mm/min obtained with stereoscopic microscopy after etching with murakami. b) Micrograph of Mill duplex stainless steel fracture welded at 300 mm/min obtained with SEM.

El comportamiento a tracción de las uniones soldadas de aceros inoxidables dúplex sinterizados se muestra en la figura 5 y los valores de los parámetros mecánicos obtenidos del diagrama tensión-deformación vienen dados en la tabla II.

Al igual que en el material de forja, los parámetros resistentes apenas sufren pérdidas con respecto al metal base, siendo éstas incluso menores que en los aceros laminados. Para las uniones soldadas a 200 mm/min se obtienen pérdidas del 2 % para la resistencia máxima y del 4,2 % para el límite elástico; respecto a las propiedades plásticas se debe mencionar que sufren un descenso más acusado, del 13,4 % para el alargamiento a rotura y del 20,4 % para la estricción, pero sin llegar a las reducciones obtenidos para el acero de forja. En el caso de velocidad de 250 mm/min se obtienen las mismas pérdidas para el límite elástico y el alargamiento,

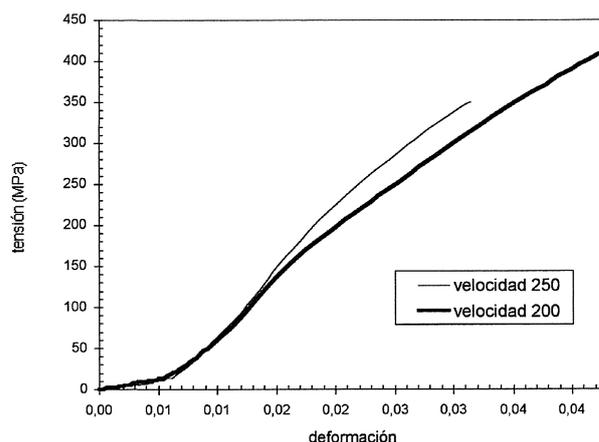


Figura 5. Influencia de la velocidad de soldeo en el comportamiento a tracción de aceros dúplex sinterizados.

Figure 5. Influence of welding speed in the tensile behaviour of sintered duplex stainless steel.

Tabla II. Resultados de ensayos de tracción de aceros inoxidables dúplex sinterizados

Table II. Tensile test results of sintered duplex stainless steels

	Límite elástico (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Alargamiento a rotura (%)	Estricción (%)
Metal base	267	394	0,58	0,88
Velocidad 200 mm/min	255	386	0,5	0,7
Velocidad 250 mm/min	255	358	0,5	0,2

mientras que la resistencia máxima se reduce en un 9,1 % y la estricción en un 77,3 %. Es importante destacar la baja plasticidad del material sinterizado respecto al material de forja, debida principalmente a la elevada porosidad y la falta de unión entre granos. Se presentan las micrografías de la fractura de un acero dúplex pulvimetalúrgico, soldado a 250 mm/min; en la figura 6 se observa la poca unión del material que contiene gran cantidad de poros intercomunicados y presenta muy poca superficie efectiva de fractura y se muestra un detalle de una de las zona de unión en la que se observan cavernas de deformación de aparente ductilidad pero mucho menor que las cavernas observadas para el acero de forja (Fig. 4 b). También se aprecia la presencia de carburos precipitados que producen el anclaje de las dislocaciones, contribuyendo a la reducción de la plasticidad.

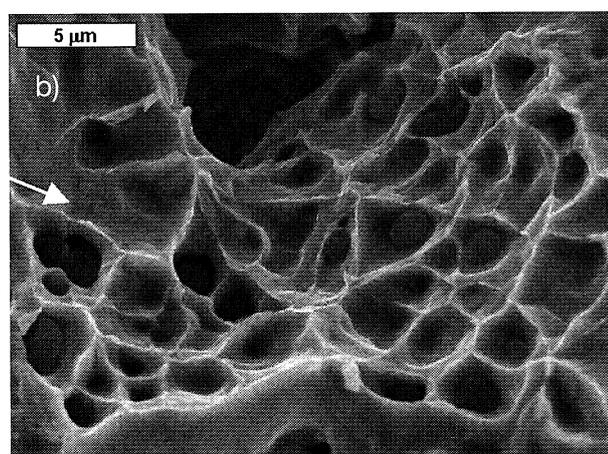
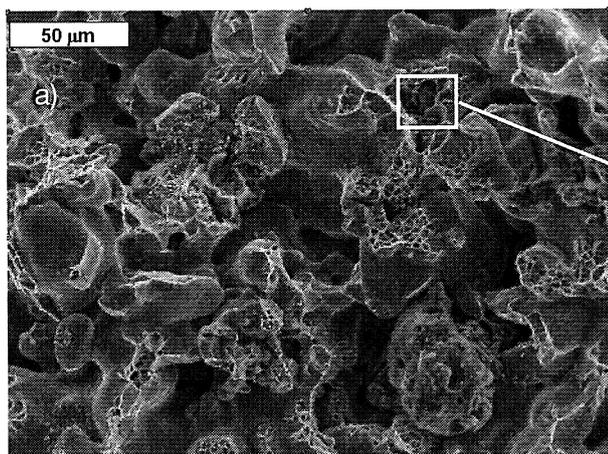


Figura 6. Micrografías de la fractura de un acero dúplex sinterizado soldado a 250 mm/min obtenida con SEM.

Figure 6. Micrographs of sintered duplex stainless steel fracture welded at 250 mm/min obtained with SEM.

Hay que destacar que, en este caso, la fractura se produce por el metal base en la zona adyacente a la ZAC a pesar de la falta de penetración de las soldaduras, lo que puede observarse en la figura 7. Esto, es debido a la reducción de la porosidad que experimenta el material en la zona de la soldadura como consecuencia de la fusión.

El efecto de la velocidad de soldeo en las propiedades mecánicas resulta similar en los dos materiales analizados; se obtienen mejores resultados, tanto en los parámetros resistentes, como de plasticidad para las uniones realizadas a menor velocidad. A menor velocidad de avance del láser aumenta la energía específica de entrada, lo que se traduce en una mayor zona de fusión y ZAC. En la figura 7 puede observarse que, al reducirse la velocidad, la anchura de la zona afectada térmicamente aumenta, mientras que no resulta apreciable el aumento de profundidad de penetración.

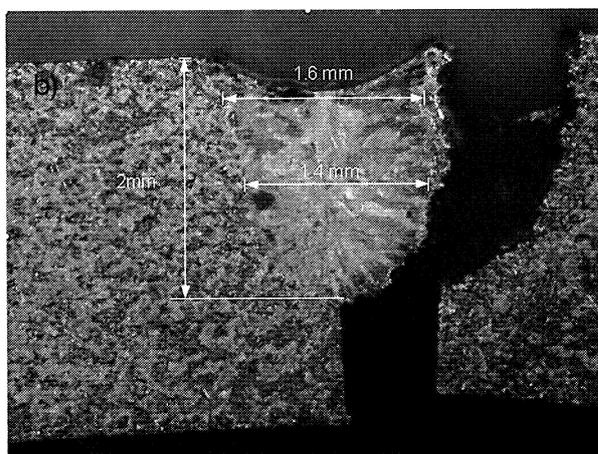
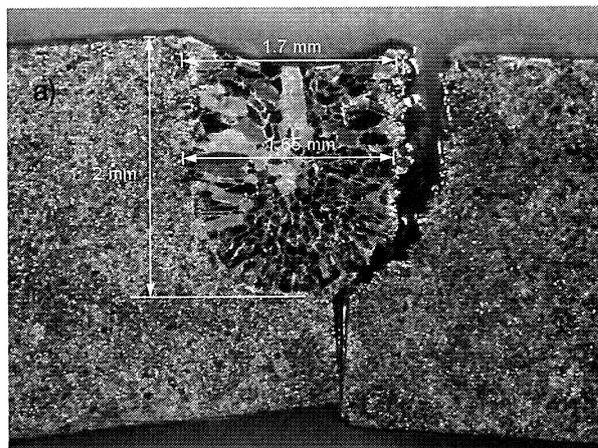


Figura 7. Vista transversal de las fracturas de aceros dúplex sinterizados soldados a distintas velocidades obtenida con microscopía estereoscópica tras ataque con murakami. (a) soldadura a 200 mm/min. (b) soldadura a 250 mm/min.

Figure 7. Transverse view of sintered duplex stainless steel fracture welded at different speed obtained with stereoscopic microscopy after etching with murakami. (a) weld at 200 mm/min. (b) weld at 250 mm/min.

El hecho de tener menos anchura de la zona de afectación térmica para una misma penetración justifica el mejor comportamiento mecánico de la unión.

3.3. Microdureza

Los resultados de microdureza para los aceros inoxidable dúplex de forja se presentan en la figura 8. La microdureza de la zona afectada térmicamente es, en el caso de velocidad de soldeo 300 mm/min, de 296 HV y, para 400 mm/min, es de 287 HV en relación con el metal base, cuya

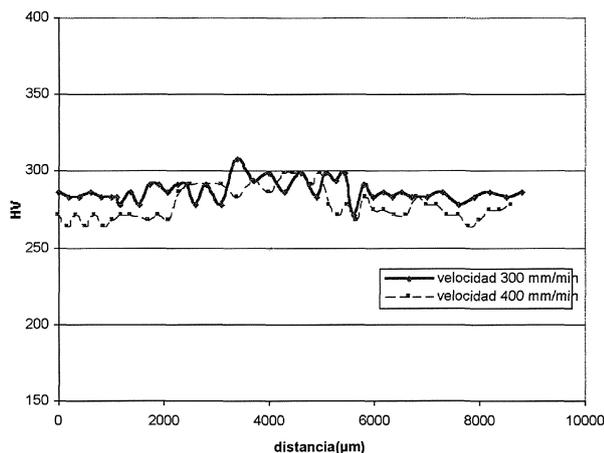


Figura 8. Evolución de la microdureza en soldaduras de aceros dúplex laminados.

Figure 8. Evolution of microhardness of mill duplex stainless steels.

microdureza es de 278 HV, por lo que el aumento de microdureza es de un 6,4 % y de un 3,2 %, respectivamente. Este aumento se debe a la ferritización que experimentan estas zonas y que contrarresta el efecto del engrosamiento de grano. Esto, también podría justificarse por la posible precipitación de compuestos intermetálicos, especialmente nitruros de cromo, debido a que la proporción de austenita en la zona de afección térmica es muy baja por lo que el nitrógeno satura la fase ferrítica y precipita, fragilizando el material, a la vez que disminuye la resistencia a la corrosión.

El material pulvimetalúrgico presenta mayor variabilidad en los valores de microdureza debido a la estructura característica de los productos sinterizados. Se observa un aumento más pronunciado de la microdureza en la zona de fusión y en la ZAC, como consecuencia del efecto adicional de la reducción de porosidad. La figura 9 muestra el comportamiento del acero inoxidable dúplex sinterizado objeto de estudio, comparado con aceros inoxidables pulvimetalúrgicos de composición 100 % 316L y 100 % 434, todos ellos soldados a la misma velocidad. La tendencia de los tres es similar, pero los valores obtenidos para el dúplex son más elevados debido a la propia estructura bifásica. Para el metal base se obtiene un valor medio de 166 HV, muy por debajo del valor obtenido para el dúplex de forja (278 HV), pero muy superior a los valores obtenidos para los aceros sinterizados 100 % 316L (97 HV) y 100 % 434 (121 HV). El valor de microdureza obtenido en la zona de la soldadura es de 264 HV por lo que la microdureza se aumenta en un 60 % respecto a la del metal base, por lo

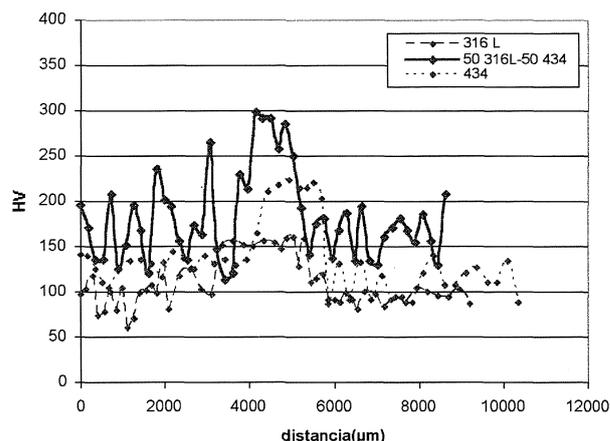


Figura 9. Evolución de la microdureza en soldaduras de aceros sinterizados.

Figure 9. Evolution of microhardness of sintered duplex stainless steels.

que con la soldadura se consiguen valores similares de microdureza en la zona afectada térmicamente para los dos aceros dúplex estudiados. Este gran aumento se debe a la casi total reducción de la porosidad que se consigue al fundirse el material durante la soldadura.

4. CONCLUSIONES

Como conclusiones fundamentales del trabajo pueden destacarse:

- Los aceros inoxidables dúplex, tanto de forja como sinterizados, al ser soldados por láser presentan unas excelentes propiedades resistentes, ya que su resistencia es similar a la del metal base y su límite elástico no se ve significativamente afectado. Por otra parte el módulo elástico también permanece en unos valores de rigidez semejantes a los de los aceros inoxidables base.
- Los parámetros plásticos, alargamiento y estricción, presentan unas pérdidas muy importantes con respecto al acero base, como consecuencia del aumento del ratio ferrita/austenita producido por la elevada velocidad de enfriamiento característica del proceso láser. En el caso de los aceros sinterizados, estas pérdidas son menos acusadas pero se acentúa más la escasa plasticidad del material base.
- Para los materiales estudiados se obtiene mejor comportamiento a tracción al disminuir la velocidad de soldeo, pues aún produciéndose una mayor entrada de calor, se obtiene un efecto de disminución de la velocidad de enfriamiento

que afecta a la microestructura obtenida y, sobre todo, al porcentaje de ferrita y austenita en la ZAC.

- El aumento de la microdureza en la zona de fusión y en la ZAC para aceros sinterizados es mucho mayor que para los aceros de forja, por lo que se obtienen valores similares en la zona de afectación térmica para ambos materiales a pesar de las diferencias existentes en los metales base. Esto se justifica por la reducción de la porosidad en el material sinterizado al fundirse el material durante la soldadura.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Asociación de Investigación de Óptica de la Comunidad Valenciana por la aplicación de las soldaduras láser, así como al soporte del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto MAT2001-1123-C03-02.

REFERENCIAS

- [1] R. KACAR, *Mater. Des.* 25 (2004) 1-9.
- [2] ZH.L. JIANG., X.Y. CHEN, H. HUANG Y X.Y. LIU, *Mater. Sci. Eng. A363* (2003) 263-267.
- [3] E. CAPELLO, P. CHIARELLO, B. PREVITALI, M. VEDANI, *Mater. Sci. Eng. A351* (2003) 334-343.
- [4] J.O. NILSSON, *Proc. Int. Conf. Duplex Stainless Steels 97*, Maastricht, The Netherlands, KCI Publisher, 1997, pp. 73.
- [5] M. NISSET Y R. DAEMEN, *Mater. Des.* 5 (1985) 291-293.
- [6] HORNG-YIH LIOU, RONG-IUAN HSIEH Y WEN-TA TSAI, *Mater. Chem. Phys.* 74 (2002) 33-42.
- [7] W.A. BAESLACK Y J.C. LIPPOLD, *Met. Constr.* 20 (1988) 26R.
- [8] J.C. LIPPOLD, W. LIN, S. BRANDI Y I. VAROL, *Fourth Int. Conf. Duplex Stainless Steels*, Vol. 1, 1994, pp 13-16.
- [9] A.J. RAMÍREZ, J.C. LIPPOLD Y S.D. BRANDI, *Metall. Mater. Trans.* 34A (2003) 1.575-1.597.
- [10] L. KARLSSON, L. RYEN Y S. PAK, *Welding J.* 1 (1995) 28.
- [11] T.H. CHEN Y J.R. YANG, *Mater. Sci. Eng. A338* (2002) 166-181.
- [12] HORNG-YIH LIOU, RONG-IUAN HSIEH Y WEN-TA TSAI, *Corros. Sci.* 44 (2002) 2.841-2.856.
- [13] I.A. SÁNCHEZ, J. POU, F. LUSQUIÑOS, F. QUINTERO, R. SOTO, H. BOUTINGUIZA, M. SAAVEDRA Y M. PÉREZ, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 204-208.
- [14] L. KARLSSON, S. RIGDAL Y F. LAKE, *Proc. Int. Conf. Duplex America 2000*, Houston, USA, KCI Publisher, 2000, p. 257.
- [15] V. MUTHUPANDI, P. BALA SRINIVASAN, S.K. SESHADRI Y S. SUNDARESAN, *Mater. Sci. Eng. A358* (2003) 9-16.
- [16] N.A. MCPHERSON, K. CHI Y T.N. BAKER, *J. Mater. Proc. Technol.* 134 (2003) 174-179.
- [17] J.M. AMADO, C. ÁLVAREZ, G. NICOLÁS, A.J. LÓPEZ, J.A. PÉREZ, A. RAMIL, E. SAAVEDRA, J. SANESTEBAN Y M.J. TOBAR, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 365-368.
- [18] N.A. MCPHERSON, T.N. BAKER, C. HU Y J.D. RUSSEL, *Proc. Int. Conf. Stainless Steel 99*, Chia Laguna, Italy, AIM Publisher, 1999, p. 361.
- [19] C. BAXTER Y N.A. MCPHERSON, *Proc. Int. Conf. Duplex America 2000*, Houston, USA, KCI Publisher, 2000, p. 315.
- [20] G. KALLA, K. JANHOFER Y E. BEYER, *Fraunhofer-Institut für Lasertechnik*, Aachen. Thyssen Stahl AG, Duisburg.
- [21] E. BEYER Y G. HERZIGER, *Schweißtechnik Koll. Schweißtechnik*, 1989, Aachen.
- [22] G.N. HAIDEMENOPOULOS, *J. Alloys Compounds* 320 (2001) 302-307.
- [23] A. ZAMBON Y F. BONOLLO, *Mater. Sci. Eng. A178* (1994) 203-207.