

PROPUESTA DE CURVA S-N DE DISEÑO PARA ACEROS ESTRUCTURALES CON BORDES RECTOS CORTADOS POR PLASMA

S. Cicero^{1,*}, T. García¹, J.A. Álvarez¹, F.T. Ibáñez-Gutiérrez¹, A. Martín-Meizoso², A. Bannister³, A. Klimple⁴

¹ Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, Av/ Los Castros s/n, 39005, Santander, Cantabria, España.

E-mail: ciceros@unican.es

² Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT),
C/ Manuel de Lardizábal, 15, 20018, San Sebastián, España.

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

⁴ Politechnika Slaska - Sutil, Akademia 2^a, 44-100 Gliwice, Polonia

RESUMEN

Este artículo presenta una propuesta de curva de diseño a fatiga para aceros estructurales con bordes rectos cortados por plasma. El corte por plasma se enmarca, junto al oxicorte y al corte láser, dentro de los métodos de corte térmico. En relación con la vida en fatiga de componentes cortados mediante corte térmico la práctica totalidad de las normas de diseño consideran únicamente el oxicorte, sin que exista respaldo normativo para cortes realizados por plasma o por láser. Por este motivo se presenta en este documento un programa experimental de fatiga (S-N) sobre cuatro aceros (S355M, S460M, S690Q y S890Q) con bordes rectos cortados por plasma. Los resultados obtenidos para cada una de las 40 probetas ensayadas se han usado para determinar la correspondiente clase FAT del Eurocódigo, que ha sido validada finalmente con una amplia revisión de los resultados obtenidos en la literatura especializada.

ABSTRACT

This paper presents a proposal of fatigue design curves for structural steels containing plasma cut straight edges. Plasma cutting is, together with flame cutting and laser cutting, one of the thermal cutting technologies. Concerning the fatigue performance of thermally cut structural components, design standards provide design curves for flame cut straight edges, but both plasma and laser cut straight edges are not covered. For this reason this document presents a fatigue experimental program (S-N) with four steels (S355M, S460M, S690Q y S890Q) presenting plasma cut straight edges. The obtained results in the 40 tested specimens have been used to derive the corresponding Eurocode FAT class, which has been finally validated through its application to a wide number of tests found in the literature.

PALABRAS CLAVE: fatiga, curva S-N, borde recto, Eurocódigo, plasma.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de corte son una parte básica en el proceso de construcción de componentes de acero, ya que permiten transformar las piezas suministradas por las acerías (con dimensiones estandarizadas y limitadas), en piezas con geometrías específicas para cada tipo de componente.

Entre el conjunto de técnicas de corte existentes en la actualidad, hay que destacar las de tipo térmico, que incluyen el oxicorte, el corte por plasma y el corte láser, y que constituyen una tecnología ampliamente extendida en el ámbito de la ingeniería. Sus principales ventajas son su versatilidad y la elevada capacidad de producción que permiten alcanzar. Sin embargo, presentan el inconveniente de introducir cambios en el material afectado térmicamente debido a las altas

temperaturas requeridas para poder completar el proceso de corte. Dichas alteraciones convierten al material en estas zonas en un material nuevo, con diferente microestructura, y consecuentemente, diferentes propiedades respecto al material base.

De forma general, bajo cargas estáticas, estas alteraciones no influyen en el comportamiento general de los componentes. En cambio, frente a cargas dinámicas, la zona afectada térmicamente puede reducir de manera muy significativa la vida útil de los mismos [1], debido a la topografía resultante de la superficie, las tensiones residuales generadas y los cambios microestructurales producidos durante el corte.

El oxicorte es el sistema de corte térmico tradicional. Sin embargo en la actualidad el corte por plasma y el

corte por láser presentan una amplia implantación en el ámbito industrial, y se han constituido como alternativas tecnológicas tanto por su calidad de corte y precisión como por su mayor productividad y flexibilidad. A pesar de estas ventajas, los fabricantes ven limitada su aplicación en muchos casos, dado que las normativas de diseño definen criterios referidos exclusivamente a bordes oxocortados (ej., la BS7608 [1] o el Eurocódigo 3 [2]).

Con todo ello, este artículo presenta una propuesta de curva de diseño a fatiga para bordes rectos cortados por plasma, obtenida mediante un programa experimental desarrollado específicamente para esta finalidad y validada mediante su aplicación a un buen número de resultados experimentales encontrados en la bibliografía.

2. CURVAS DE FATIGA DEL EUROCÓDIGO

Las curvas S-N propuestas por el Eurocódigo 3 [2] presentan las siguientes características principales:

- A cada categoría de detalle se le asigna una clase FAT (ej., FAT90), que representa el rango de tensiones normales que es capaz de soportar cuando la rotura tiene lugar tras 2 millones de ciclos.

- La parte inclinada de la curva S-N presenta dos pendientes diferentes: $m = 3$ cuando el número de ciclos es inferior a 5 millones, y $m=5$ cuando el número de ciclos está entre 5 y 100 millones.

- Finalmente, el límite de fatiga bajo cargas de amplitud constante se corresponde con el valor que alcanza la parte inclinada de la curva S-N cuando el número de ciclos es igual a 5 millones.

En la Figura 1 se recogen las curvas S-N de diseño propuestas por el Eurocódigo 3 [2]. Se consideran 14 categorías de detalle, que van desde la clase FAT160 hasta la clase FAT36 (de más a menos resistente).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las curvas de diseño a fatiga de aceros estructurales están referidas (cada una de ellas) a geometrías específicas (ej., borde recto, agujero, soldadura a tope,...) independientemente del acero específico que esté siendo utilizado. Por lo tanto, las curvas S-N de diseño resultantes han de proporcionar predicciones seguras (y lo más ajustadas posibles) para todo el rango de aceros estructurales. Por esta razón, el programa experimental de este trabajo incluye cuatro aceros diferentes:

- S355M (EN 10025-4 [3]): acero estructural de grano fino laminado termomecánicamente con microestructura ferrítico-perlítica. Tiene un límite elástico mínimo garantizado de 355 MPa, lo cual se corresponde con una resistencia mecánica media-baja

(TGS8: *Technical Group Steel: Steel products and applications for building, construction and industry. Internal report. Research Fund for Coal and Steel Unit (RFCS). European Commission*). El acero, al igual que los otros tres analizados en este trabajo, fue suministrado en chapas de 15 mm de espesor.

- S460M (EN 10025-4 [3]): es igualmente un acero estructural de grano fino laminado termomecánicamente con microestructura ferrítico-perlítica, con un límite elástico mínimo garantizado en este caso de 460 MPa. Se corresponde (según TGS8) con un acero de resistencia mecánica media-alta.

- 690Q (EN 10025-6 [4]): es un acero de alta resistencia templado y revenido. Su límite elástico mínimo es de 690 MPa, y presenta una microestructura con bainita y martenista revenida.

- S890Q (EN 10025-6 [4]): acero de alta resistencia templado y revenido. Su límite elástico mínimo es de 690 MPa, y presenta una microestructura con bainita y martenista revenida.

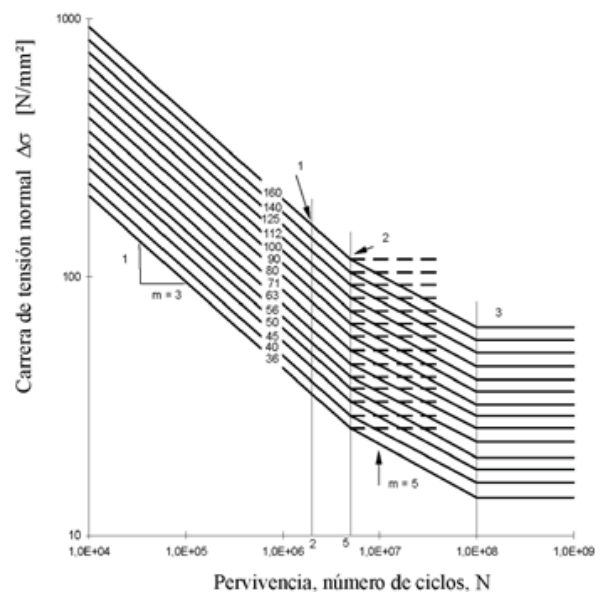


Fig. 1. Curvas S-N y categorías de detalle del Eurocódigo [2].

Este trabajo no trata de obtener los parámetros de corte óptimos para el proceso de corte por plasma, sino que busca determinar el comportamiento a fatiga de bordes rectos cortados por plasma cuando se utilizan los parámetros de corte utilizados comúnmente por la industria. En la práctica estos parámetros no varían demasiado y dependen más de factores económicos del proceso de corte que de la calidad final del corte obtenido (siempre que quede garantizada una calidad mínima del mismo). La Tabla 1 presenta los parámetros de corte utilizados aquí.

Un total de 40 probetas de fatiga fueron ensayadas, 10 por cada acero. La geometría de las mismas queda recogida en la Figura 2 [5]. Puede observarse que las probetas, extraídas en la dirección de laminado, presentaban el corte por plasma a lo largo de toda su longitud.

Tabla 1. Parámetros de corte utilizados.

Corriente del arco (A)	200
Voltaje del arco (V)	131
Velocidad de corte (mm/min)	2200
Separación de la antorcha (mm)	4.1
Flujo de oxígeno (l/min)	
Iniciación del arco	24
Corte	69
Flujo de aire (l/min) (gas protector)	
Iniciación del arco	65
Corte	28
Tiempo de perforación (s)	0.6
Separación de antorcha en perforación (mm)	8.2

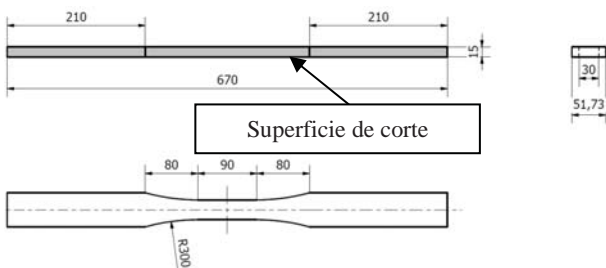


Fig. 2. Geometría de las probetas de fatiga. Cotas en mm.

Las probetas fueron sometidas a ciclos de carga siguiendo las recomendaciones de la ASTM E466 [5] y de la ASTM E739 [6]. Específicamente, cada probeta fue sometida a una amplitud de cargas constante hasta su rotura final, estableciéndose un nivel de run-out de 10^7 ciclos. Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayos de alta frecuencia (resonancia) con una capacidad de carga de 400 kN, siendo la razón de cargas R ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) 0.1, tal y como adoptan muchos de los programas experimentales encontrados en la literatura (ej., [7-9]). La frecuencia de cargas osciló entre 77 y 79 Hz en las distintas probetas ensayadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 3 a 6 muestran los resultados para cada uno de los cuatro aceros analizados, así como la curva

de ajuste por mínimos cuadrados y el límite a fatiga, definido como aquel valor de la variación tensional en el que se obtienen dos run-outs consecutivos sin fallo previo.

Se puede observar el diferente comportamiento en fatiga observado para cada material, tanto en el rango de vida en fatiga finita como en cuanto a los valores de límite de fatiga. El mejor comportamiento en fatiga se observa en el acero S890Q, mientras que el peor comportamiento parece ser el del acero S355M. En todo caso, la curva de diseño para bordes rectos cortados por plasma ha de poder aplicarse a todo tipo de aceros estructurales, por lo que deberá proporcionar resultados satisfactorios para los cuatro aceros aquí analizados.

Las curvas de ajuste de los resultados experimentales suelen seguir expresiones del tipo:

$$\log N = \log A - m \cdot \log \Delta \sigma \quad (1)$$

en donde N es el número de ciclos hasta rotura, $\Delta \sigma$ es la variación tensional aplicada, y tanto $\log A$ como m son los parámetros de ajuste ($\log A$ es el intercepto y m es la pendiente de la curva de ajuste).

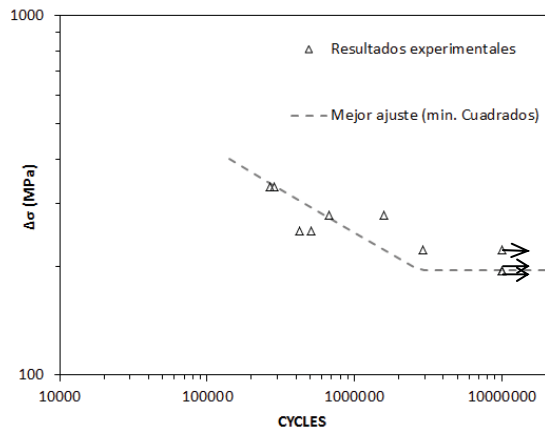


Fig. 3. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S355M.

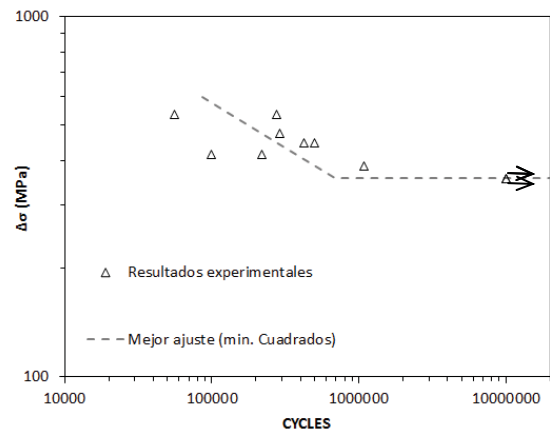


Fig. 4. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S460M.

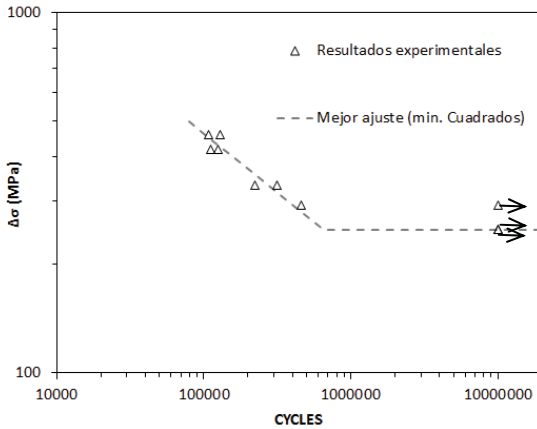


Fig. 5. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S690Q.

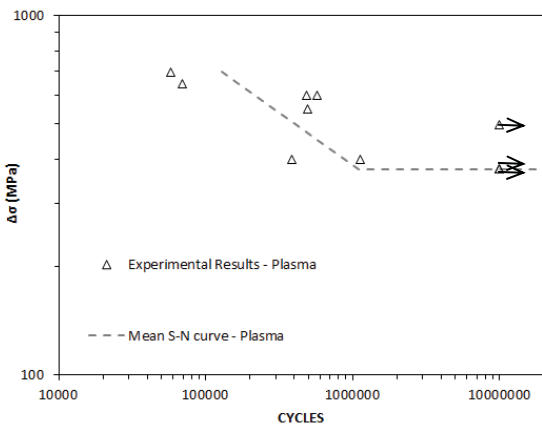


Fig. 6. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S890Q.

Con el objetivo de definir la curva de diseño a fatiga para bordes rectos cortados por plasma, se va a seguir el procedimiento estadístico propuesto en el Eurocódigo 3 [2], que consiste en determinar la ecuación (1) para los resultados experimentales obtenidos con un valor fijo de m (pendiente de la curva de ajuste) igual a 3. Por lo tanto, se trata de definir la ecuación (2):

$$\log N = \log A_{\text{design,tests}} - 3 \cdot \log \Delta \sigma \quad (2)$$

en donde

$$\log A_{\text{design,tests}} = \log A_{\text{mean,tests}} - k \cdot \text{Stdv} \quad (3)$$

Stdv es la desviación estándar asociada a la categoría de detalle analizada, y k es un coeficiente que tiene en cuenta la probabilidad de supervivencia ($\alpha=95\%$) y el nivel de confianza (75%) considerados por el Eurocódigo 3, y que sigue la siguiente expresión [10]:

$$k = \frac{t(p, n-1)}{\sqrt{n}} + \varphi_{(\alpha)}^{-1} = \frac{t(0.975, n-1)}{\sqrt{n}} + 1.645 \quad (4)$$

donde t es el valor de una distribución t de Student correspondiente a un nivel de confianza (p) y número de grados de libertad ($n-1$). Para una distribución de dos colas (*two sided*) $p=\beta=0.75$, mientras que para una distribución de una cola (*one sided*) $p=(1+\beta)/2=0.875$. n es el número de ensayos realizados y $\varphi_{(\alpha)}^{-1}$ es el valor correspondiente a una probabilidad de excedencia (α) de una función de distribución normal. Para programas experimentales con un número de ensayos elevado, este procedimiento equivale a establecer una probabilidad de fallo del 2.3% [11-13].

Una vez que el valor de $\log A_{\text{design,tests}}$ ha sido calculado, es posible determinar la clase FAT de fatiga correspondiente, con lo cual queda completamente definida la curva de fatiga teniendo en cuenta que la pendiente de la curva es conocida y que la clase FAT es la variación tensional correspondiente a $2 \cdot 10^6$ millones de ciclos hasta el fallo (es decir, se conoce la pendiente y un punto de la recta):

$$\text{FAT}_{\text{design,tests}} = 10^{\frac{(\log A_{\text{design,tests}}) - \log(2 \cdot 10^6)}{s}} \quad (5)$$

La Tabla 2 muestra el valor FAT derivado de los ensayos realizados para cada acero, así como la clase FAT del Eurocódigo inmediatamente inferior (aquí es importante advertir que el Eurocódigo presenta un número finito de clases FAT).

Tabla 2. Clases FAT derivadas de los ensayos y clases FAT del Eurocódigo asociadas.

	FAT _{design,tests}	Eurocódigo
S355M	133	FAT125
S460M	161	FAT160
S690Q	125	FAT125
S890Q	203	FAT160

Dado que la clase FAT buscada en esta investigación ha de valer para todos los aceros estructurales, se propone aquí la utilización de la clase FAT 125 del Eurocódigo para el análisis a fatiga de bordes rectos cortados por plasma. Esta propuesta podrá generar, obviamente, resultados conservadores para aceros con alta resistencia mecánica.

La Figura 7 muestra los 40 resultados experimentales junto con la curva de diseño del Eurocódigo asociada a la clase FAT 125. La curva define el límite a fatiga (tramo horizontal) como el valor tensional asociado a una vida en fatiga de $5 \cdot 10^6$ ciclos, asumiendo que la variación de tensiones es siempre la misma.

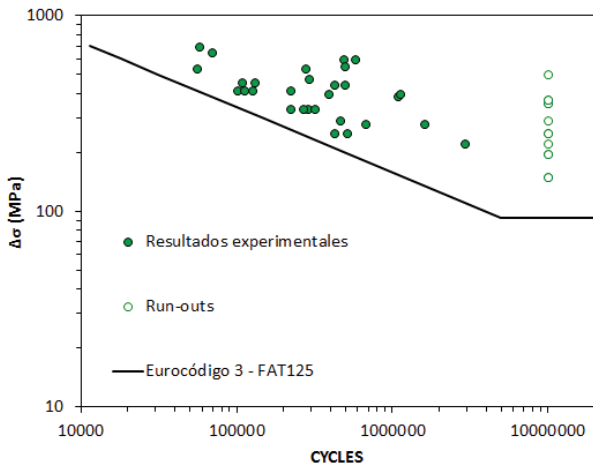


Fig. 7. Curva de diseño propuesta (FAT 125) y comparativa con resultados experimentales.

Se puede observar cómo la curva S-N propuesta queda por debajo de los resultados experimentales obtenidos, tanto en el rango de vida en fatiga finita como en relación con el límite de fatiga. De igual modo, el conservadurismo de la curva se mantiene dentro de unos márgenes razonables.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que la clase FAT 125 es la proporcionada por el Eurocódigo 3 para el caso de bordes rectos oxycortados sin saneamiento de bordes posterior (a este último caso le correspondería una clase FAT 140). Por lo tanto, en relación con los bordes rectos cortados por plasma, bastaría con utilizar la curva S-N de diseño propuesta actualmente por el Eurocódigo 3 para el caso de bordes oxycortados.

Finalmente, la clase FAT propuesta se ha validado con 345 resultados experimentales encontrados en la literatura especializada [7,8, 12-21], que incluyen espesores de hasta 25 mm y diferentes relaciones de carga. La Figura 8 muestra los resultados, pudiéndose observar cómo el ajuste de la curva propuesta es adecuado, quedando únicamente 6 puntos por debajo de la misma (1.73% de resultados inseguros, en consonancia con el 2.3% de probabilidad de fallo previsto por el procedimiento estadístico).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se completa y analiza un programa experimental de fatiga con el objetivo de definir la curva de diseño S-N correspondiente a aceros estructurales con bordes rectos cortados por plasma, la cual no está disponible actualmente en las principales normativas de diseño. El programa experimental lo componen 40 probetas fabricadas con 4 aceros estructurales diferentes que cubren un amplio rango de resistencias mecánicas, que van desde el S355M hasta el S890Q.

La curva finalmente propuesta se corresponde con la clase FAT 125 del Eurocódigo 3, que es la misma que utiliza dicha norma para bordes oxycortados sin saneamiento de bordes posterior.

La propuesta ha sido validada de forma satisfactoria mediante su aplicación a 345 resultados experimentales procedentes de la bibliografía.

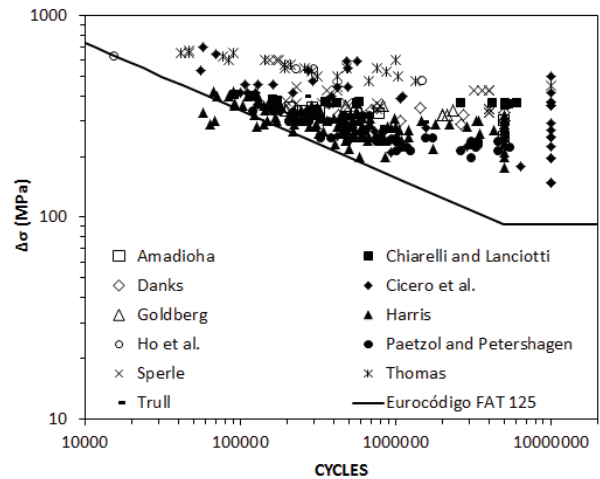


Fig. 8. Curva de diseño propuesta (FAT 125) y validación con 345 resultados encontrados en la literatura especializada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Comisión Europea la financiación del proyecto HIPERCUT: “High Performance Cut Edges in Structural Steel Plates for Demanding Applications” (RFSR-CT-2012-00027), de cuyos resultados se deriva este artículo.

REFERENCIAS

[1] BS 7608: 2013, Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures, BSI (British Standards Institution), London, UK, 2013.

[2] EN 1993-1-9, Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga, CEN (European Committee for Standardization), 2005.

[3] EN 10025-4, Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels, CEN (European Committee for Standardization), Brussels, Belgium, 2004.

[4] EN 10025-6, Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition, CEN (European

Committee for Standardization), Brussels, Belgium, 2004.

[5] ASTM E466-07, Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue test of metallic materials, ASTM (ASTM International), West Conshohocken, PA, USA, 2007.

[6] ASTM E739-10, Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain life (ϵ -N) fatigue data, ASTM (ASTM International), West Conshohocken, PA, USA, 2010.

[7] Harris, I. D., Plasma arc cutting of bridge steels, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 384, National Academy Press, Washington DC, USA, 1997.

[8] Danks, S., Appropriate specification for a plasma cut surface, Corus Report No: 132590, Corus Research, Development & Technology, Rotherham, UK., 2007.

[9] Jezernik, N., Glodez, S., Vuherer, T., Spes, B., and Kramberger, J, The influence of mechanical and laser cutting process on the fatigue strength of high strength steel S960Q, Key Eng. Mat. 348-349, 669-672, 2007.

[10] Recommendations for fatigue design of welded joints and components, XIII-1965-03/XV-1127-03, International Institute of Welding (IIW), Paris, France, 2009.

[11] BS 7608:1993, Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures, BSI (British Standards Institution), London, UK, 1993.

[12] Fisher, J.W., Frank, K.H., Hirt, M.A., McNamee, B.M., Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 102, Highway Research Board, Washington DC, USA, 1970.

[13] Fisher, J.W., Albrecht, P.A., Yen, B.T., Klingerman, D.J., McNamee, B.M., Fatigue strength of steel beams with welded stiffeners and attachments, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 147, Transportation Research Board. 1974 Washington DC, USA, 1974.

[14] Amadioha, A.U., Fatigue performance of laser and plasma cut edges, Tata Steel Report No: 152628, Tata Steel Research, Development & Technology, Rotherham, UK, 2011.

[15] Goldberg, F., Influence of thermal cutting and its quality on the fatigue strength of steel, Weld. Res. Suppl. 52, 392-404, 1973.

[16] Ho, N.J., Lawrence, J.R., Alstetter, C.J., The fatigue resistance of plasma and oxygen cut steel, Weld. Res. Suppl., 231s-236s, 1981.

[17] Sperle, J.O., Influence of parent metal strength on the fatigue strength of parent material with machined and thermally cut edges, Weld. World., 52, 79-92, 2008.

[18] Trull, M., Examination of the quality of laser cut edges in ABRAZO 400 steel, Tata Steel Report No: 160033, Tata Steel Research, Development & Technology, Rotherham, UK, 2015.

[19] Chiarelli, M., Lanciotti, A., Effect of plasma cutting on the fatigue resistance of Fe510 D1 steel, J. Eng. Mater. Technol., 122, 141-145, 2000.

[20] Thomas, D.J., Characterisation of steel cut edges for improved fatigue property data estimations and enhanced CAE durability, PhD Thesis, Swansea University, Swansea, UK, 2011.

[21] Paetzold, H., Petershagen, H., Fatigue assessment of plasma cut edges in ship structures, Proc. Int. Conf. on Fatigue of Welded Components and Structures, Societe Francaise de Metallurgie et de Materiaux, Senlis, France, 123-130, 1996.