

PROPUESTA DE CURVA S-N DE DISEÑO PARA CHAPAS DE ACERO ESTRUCTURAL CON AGUJEROS CORTADOS POR LÁSER

S. Cicero^{1*}, T. García¹, J.A. Álvarez¹, F.T. Ibáñez-Gutiérrez¹, A. Klimplel², A. Bannister³, A. Martín-Meizoso⁴

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

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

⁴ Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT),
C/ Manuel de Lardizábal, 15, 20018, San Sebastián, España.

RESUMEN

Este artículo presenta una propuesta de curva de diseño a fatiga para chapas de acero estructural con agujeros cortados por láser. El corte por láser se encuadra, junto al oxicorte y al corte por plasma, dentro de los métodos de corte térmico. En relación con la vida en fatiga de componentes con agujeros obtenidos mediante corte térmico la práctica totalidad de las normas de diseño no cubre este tipo de detalle estructural, limitándose a proporcionar curvas de diseño para agujeros taladrados o punzonados. Por este motivo, y por el hecho de que de entre todos los métodos de corte térmico el láser proporciona las mejores tolerancias geométricas en el corte de agujeros, se presenta en este documento un programa experimental de fatiga (S-N) sobre cuatro aceros (S355M, S460M, S690Q y S890Q) con agujeros cortados por láser. Los resultados obtenidos para cada una de las 40 probetas ensayadas se han usado para determinar la correspondiente clase FAT del Eurocódigo.

ABSTRACT

This paper presents a proposal of fatigue design curves for structural steel plates containing laser cut holes. Laser cutting is, together with flame cutting and plasma cutting, one of the thermal cutting technologies. Concerning the fatigue performance of thermally cut structural components, design standards do not generally provide design curves for thermally cut holes, covering just drilled or punched holes. For this reason, and also because among the thermal cutting methods it is laser cutting the one providing the best geometric tolerances, this document presents a fatigue experimental program (S-N) with four steels (S355M, S460M, S690Q y S890Q) presenting laser cut holes. The obtained results in the 40 tested specimens have been used to derive the corresponding Eurocode FAT class.

PALABRAS CLAVE: fatiga, curva S-N, agujero, Eurocódigo, laser.

1. INTRODUCCIÓN

Desde que una pieza de acero sale del tren de laminación hasta que se dispone en su ubicación definitiva formando parte de una estructura es preciso llevar a cabo una serie de procesos de transformación intermedios que permitan alcanzar los requerimientos exigidos. De entre todos ellos el corte es una de las primeras operaciones que es necesario llevar a cabo y tiene por objeto obtener piezas con la geometría deseada.

Los procesos de corte térmico constituyen la tecnología más extendida para la fabricación de componentes demandados por numerosos sectores, que incluyen entre otros la construcción de puentes y estructuras

metálicas, industria naval, maquinaria de construcción y la industria del automóvil.

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 (ej., la BS7608 [1] o el Eurocódigo 3 [2]) definen criterios referidos exclusivamente al oxicorte en el caso de cortes rectos o, directamente, no contemplan ningún tipo de corte térmico. Este último caso es el de los agujeros

realizados en chapas, los cuales solo tienen cobertura normativa frente a la fatiga cuando se realizan mediante taladrado o punzonado [1,2]. En algún caso, como por ejemplo la Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts [3] se establece que los agujeros cortados térmicamente pueden ser utilizados en estructuras sometidas a cargas estáticas, y en caso de que existan cargas dinámicas el ingeniero responsable será el que dictamine sobre su posible adopción. Sin embargo, muchos fabricantes optan por no ejercer esta posibilidad dada la escasa disponibilidad de estudios que avalen el empleo de agujeros cortados térmicamente en condiciones de sollicitación dinámica.

Con todo ello, este artículo presenta una propuesta de curva de diseño a fatiga para agujeros cortados por láser (el corte térmico que proporciona mejores tolerancias geométricas en la fabricación de agujeros), obtenida mediante un programa experimental desarrollado específicamente para esta finalidad.

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 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 [4]): 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 [4]): 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 [5]): 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 [5]): acero de alta resistencia templado y revenido. Su límite elástico mínimo es de 890 MPa, y presenta una microestructura con bainita y martenista revenida.

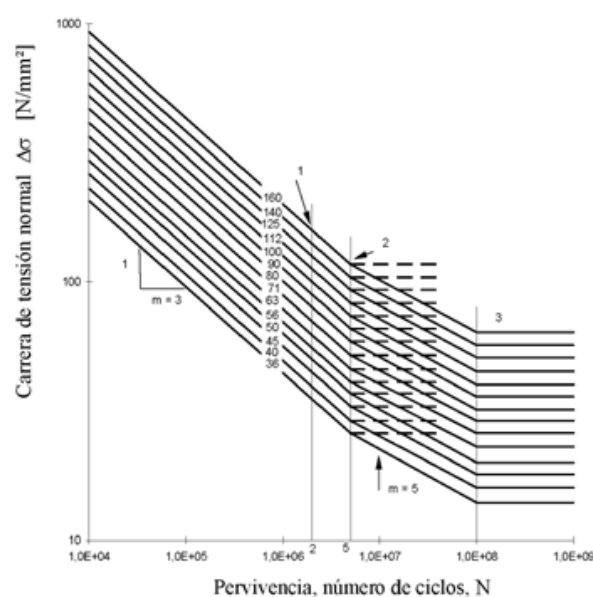


Fig. 1. Curvas S-N y categorías de detalle del Eurocódigo [2].

Este trabajo no trata de optimizar los parámetros de corte por láser, sino que busca determinar el comportamiento a fatiga de agujeros cortados por esta técnica cuando se utilizan los parámetros de corte utilizados comúnmente por la industria. En la práctica estos parámetros apenas varían y dependen más de factores económicos 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.

Tabla 1. Parámetros de corte utilizados.

Potencia del haz láser (W)	3600
Velocidad de corte (mm/min)	1000
Diámetro del foco (mm)	0.2
Posición del foco	En la superficie de la chapa
Presión del gas auxiliar Oxígeno (bar)	0.6

Un total de 40 probetas de fatiga fueron ensayadas, 10 por cada acero. La geometría de las mismas queda recogida en la Figura 2. Dada la ausencia de este tipo de probetas en la normativa actual, ha sido necesario recurrir a otros diseños propuestos en la bibliografía [6]. El agujero de cada una de ellas fue realizado mediante corte por láser, en tanto que los bordes de las probetas fueron mecanizados. Conviene señalar que, para la fabricación de las mismas, se ha tomado la precaución de adoptar el centro del orificio como punto inicial del corte y uno de los dos extremos del diámetro paralelo a la dirección de aplicación de las cargas como punto final.

Todas las probetas fueron extraídas con su longitud en la dirección de laminado de la chapa.

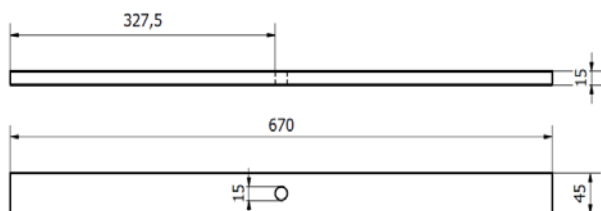


Fig. 2. Geometría de las probetas de fatiga. Cotar en mm.

Las probetas fueron sometidas a ciclos de carga siguiendo las recomendaciones de la ASTM E466 [7] y de la ASTM E739 [8]. Cada probeta fue ensayada con 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., [9-11]), y que constituye además una solución de compromiso para la evaluación de este tipo de componentes tanto en puentes como en maquinaria de construcción. 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 junto con la curva de ajuste por mínimos cuadrados y el límite a fatiga. Este último se ha definido como aquel valor de la variación tensional en el que se obtienen dos run-outs consecutivos sin fallo previo.

Los resultados muestran diferente comportamiento a fatiga en cada material, tanto en el rango de vida en fatiga finita como en cuanto a los valores de límite de fatiga. La tendencia general es a aumentar la vida en fatiga a medida que aumenta la resistencia mecánica del acero, si bien el efecto del grado del acero se observa fundamentalmente en el acero de menor resistencia (355M), siendo las diferencias entre el resto de aceros menos significativas.

En cualquier caso, la curva de diseño agujeros cortados por láser 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).

Con el objetivo de definir la curva de diseño a fatiga para agujeros cortados por láser, 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 [12]:

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

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% [13-15].

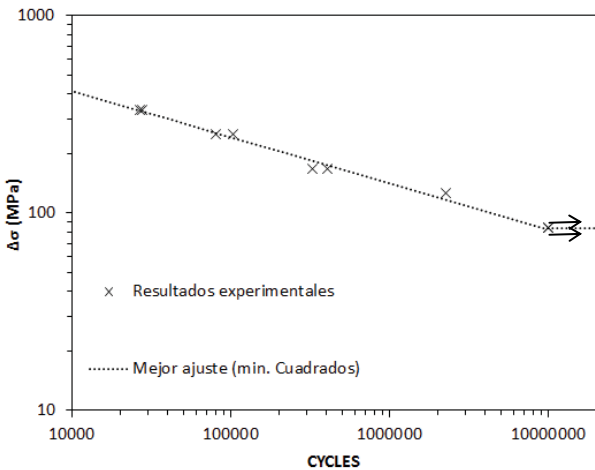


Fig. 3. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S355M.

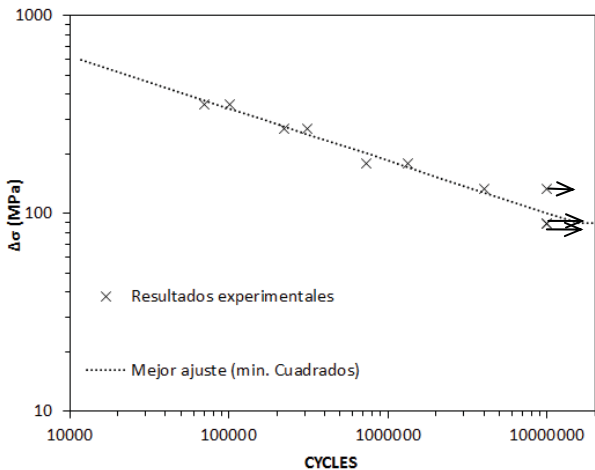


Fig. 4. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S460M.

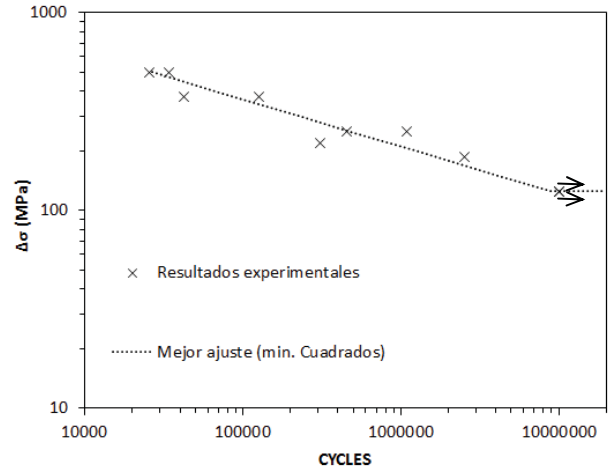


Fig. 5. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S690Q.

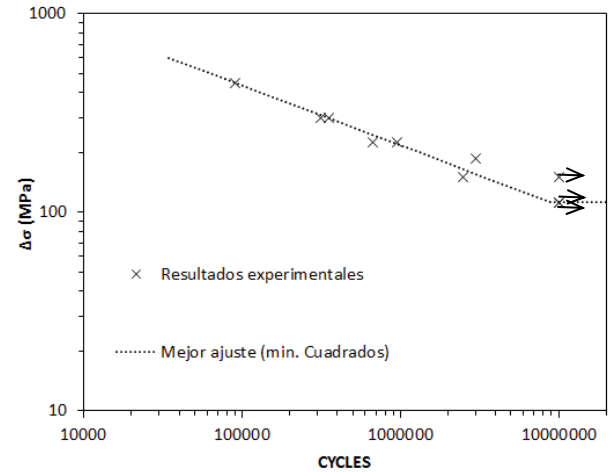


Fig. 6. Resultados experimentales, mejor ajuste por mínimos cuadrados y límite de fatiga. S890Q.

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):

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

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	60	FAT56
S460M	92	FAT90
S690Q	96	FAT90
S890Q	113	FAT100

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 56 del Eurocódigo para el análisis a fatiga de bordes rectos cortados por plasma. Esta propuesta generará, 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 56. 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.

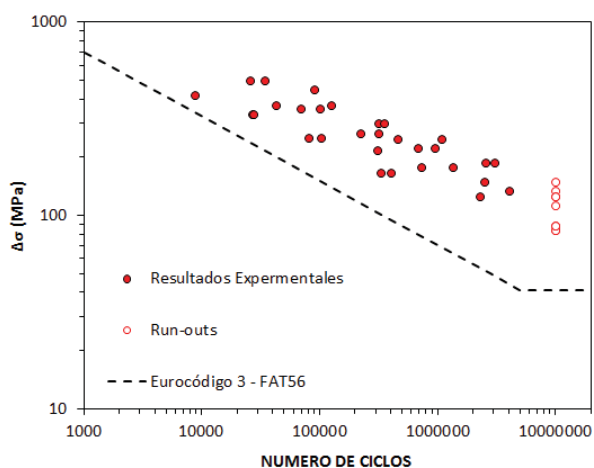


Fig. 7. Curva de diseño propuesta (FAT 56) y comparativa con resultados experimentales.

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. El conservadurismo de la curva es notable para muchos de los resultados experimentales, no habiendo ningún resultado del lado de la inseguridad (frente al 2.3% de probabilidad de fallo que admite la metodología estadística de cálculo).

Por otra parte, es importante tener en cuenta que el Eurocódigo 3 proporciona una clase FAT90 para agujeros taladrados. Por lo tanto, en relación con los agujeros cortados por láser, no se podría utilizar la

curva S-N de diseño propuesta actualmente por el Eurocódigo 3 para agujeros taladrados o punzonados, si no que habría que hacer uso de una FAT notablemente inferior (en este caso, FAT 56) como consecuencia de la baja resistencia a fatiga obtenida en el acero de menor grado.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo recoge y analiza un programa experimental de fatiga con el objetivo de definir la curva de diseño S-N correspondiente a chapas de acero estructural con agujeros cortados por láser, 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 56 del Eurocódigo 3, que es notablemente inferior a la clase FAT 90 propuesta por esta norma para agujeros taladrados. Esta reducción de las prestaciones a fatiga viene condicionada por los resultados experimentales obtenidos en el acero de menor resistencia mecánica (S355M).

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] Specification for structural joints using high-strength bolts. RCSC, Committee A.1. 2009.
- [4] EN 10025-4, Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels, CEN (European Committee for Standardization), Brussels, Belgium, 2004.
- [5] 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.

[6] Bannister, A.C, Skalidakis, M., Pariser, A., Langenberg, P., Gutierrez-Solana Salcedo, F., Sanchez, L. and Pesquera, D. 'Performance criteria for cold formed structural steels' ECSC Final Report No EUR 22056EN. Directorate General for Research, Contract No 7210-PR/246. European Commission 2006.

[7] 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.

[8] 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.

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

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

[11] 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.

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

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

[14] 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.

[15] 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.