

Estudio experimental del efecto de bruñido sobre la vida a fatiga de probetas de acero AISI 1038

R. Jerez Mesa¹, G. Gómez Gras², J.A. Travieso Rodríguez³, J. Llumà Fuentes⁴, O. Casadesús⁵, M. Madueño Guerero⁶

¹EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. ramon.jerez@upc.edu

²EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. giovanni.gomez@upc.edu

³EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. antonio.travieso@upc.edu

⁴EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Cien de Mat e Ing Metalúrgica. jordi.lluma@upc.edu

⁵EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. oriol.casadesus@estudiant.upc.edu

⁶EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. manel.madueno@estudiant.upc.edu

El bruñido es una operación de acabado por deformación plástica que se ejecuta con herramientas dotadas de elementos indentadores capaces de transmitir una fuerza controlada. Este proceso es conocido por su capacidad de causar un triple efecto sobre la superficie tratada, incrementando su dureza superficial, disminuyendo su rugosidad media, e introduciendo tensiones residuales a compresión hasta capas más bajas del material. Las referencias científicas que estudian el proceso evalúan en su mayoría la medida en que estas mejoras se producen, pero sin embargo, existe aún un amplio campo de estudio para profundizar en cómo se manifiestan estas mejoras en aspectos de segundo orden, como puede ser el comportamiento a fatiga de las piezas tratadas con el bruñido. En este artículo se toma como foco de estudio la vida a fatiga de probetas de acero bruñidas bajo diferentes condiciones, a través de la elaboración de las curvas de Wöhler correspondientes. Las condiciones de bruñido aplicadas permiten interpretar los resultados en términos de la influencia del grado de trabajo de deformación en frío que sufre el material, y son la antesala para próximos estudios más amplios donde se exploren una mayor combinación de valores de parámetros de bruñido. Se concluye que una mayor cantidad de trabajo en frío mediante la herramienta de bruñido diseñada por los autores, provoca un aumento de la vida de fatiga de las probetas tratadas, respecto de los resultados obtenidos en probetas no bruñidas.

1. Introducción

El bruñido es una operación de acabado por deformación plástica por acción de un indentador de geometría variable, que rueda libremente sobre la superficie objetivo ejerciendo una fuerza de valor controlado. Este proceso es conocido por su facilidad de aplicación –en la misma máquina en la que se ejecuta el mecanizado de la pieza objetivo– y su efecto combinado de disminución de la rugosidad superficial, aumento de la dureza y las tensiones residuales compresivas de la pieza [1]. Este efecto integral que se puede conseguir sobre una pieza ejecutando únicamente un proceso posiciona al bruñido con una ventaja favorable respecto de otros procesos de acabado.

Las referencias clásicas sobre bruñido centran su análisis principalmente en la relación entre los parámetros del proceso aplicados y los resultados obtenidos en base a la rugosidad y durezas superficiales finales de las piezas. Puede pensarse que esto se debe a que una de las aplicaciones iniciales del proceso fue la de mejorar la integridad superficial de las piezas para minimizar el desgaste en ejes y árboles, o a la optimización del acabado de moldes [2]. Como consecuencia, la caracterización de la influencia de los parámetros de bruñido sobre otros parámetros que no pueden ser medidos directamente, como la vida a fatiga, ha sido estudiada en menor medida. Hassan et al. (1996) compararon la vida a fatiga de probetas de aluminio y latón puros comerciales sin bruñir y tras ser bruñidos con 150 N de fuerza [3]. El alargamiento de la vida a fatiga de las probetas bruñidas fue explicado por los autores como una consecuencia de las tensiones residuales a compresión introducidas por el proceso.

Estudios posteriores dieron lugar a estudios de caso más completos, en tanto que introdujeron nuevos factores a tener en cuenta en el análisis. Prevey et al. (2001) Ensayaron probetas de aluminio AA-7075-T6 a fatiga, en atmósferas de aire salino, para evaluar el efecto del bruñido sobre la corrosión. El bruñido demostró alargar la vida a fatiga de probetas en todos los casos, y especialmente en aquellos ensayos realizados en ambiente salino, por lo que se concluyó que el bruñido permite también mejorar la resistencia a la corrosión de ciertos materiales [4].

Otros autores, como Seemikeri et al., aplicaron el diseño de experimentos para introducir una mayor cantidad de factores en el sistema, sobre probetas de acero AISI 1045. La fuerza resultó ser el parámetro más influyente en el alargamiento de la vida a fatiga, seguida de la velocidad de bruñido y la interacción entre ésta y el diámetro de la bola [5]. Aviles et al. (2013) ensayaron el mismo material, llegando a conclusiones similares [6]

Por otro lado, Majzoobi et al. compararon la influencia del bruñido sobre la vida a fatiga de probetas de aluminio AA-7075-T6 con el del granallado, llegando a la conclusión de que el bruñido permitía aumentar la vida a fatiga de dichas probetas en un 21,25%, pero sólo para fatiga en altos ciclos, esto es, para niveles de tensión bajos que den lugar a vidas superiores a los 10^4 ciclos [7]. Los autores atribuyen este comportamiento al defecto superficial en forma de parches superpuestos que el bruñido puede provocar sobre la superficie tratada, que actúan como concentradores de tensión, y que pueden acelerar la rotura de la probeta. Estos resultados se alinean con los obtenidos por otros autores sobre materiales como el INCONEL 720 [8] o Ti-6Al-4V [9].

En base a estos resultados, en este trabajo se evalúa la influencia del bruñido sobre los resultados de la vida a fatiga de probetas de acero AISI 1035, ejecutando el proceso con una herramienta preparada para trabajar en dos regímenes, tanto el convencional sin asistir como el asistido por vibraciones. Este estudio se corresponde, pues, con una primera etapa de aproximación al problema, que será completada en el futuro con los resultados de la influencia del proceso asistido por vibraciones.

2. Materiales y métodos

2.1. Herramienta de bruñido

La herramienta empleada fue diseñada, fabricada y caracterizada por Gómez-Gras et al. (2011) [10]. Como se puede ver en la figura 1a, la herramienta es acoplada a la máquina a través de un cono ISO o roscada directamente sobre el cabezal giratorio de la fresadora. En este sistema de anclaje se incluye un muelle alojado en el interior de la herramienta, cuya compresión calibrada permite regular in situ la fuerza nominal ejercida durante el proceso. Esta curva (figura 1b) tiene relación directa con la constante del muelle, y es por este motivo que muestra un comportamiento explicado por la Ley de Hooke.

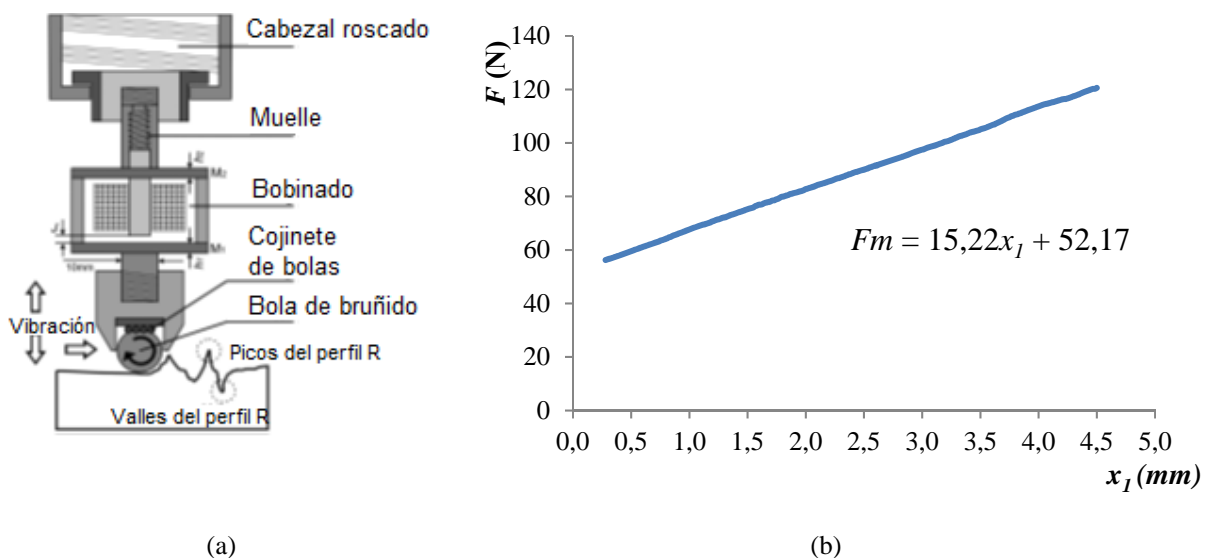


Figura 1: Herramienta empleada para los ensayos. (a) Representación esquemática. (b) Zona lineal de la curva de calibración.

Aguas abajo del muelle, puede observarse la presencia de un espacio reservado para una bobina que, excitada por un generador externo, permite hacer vibrar las dos placas M1 y M2, asistiendo así el proceso [11,12]. El sistema descrito está finalizado por un elemento portante con un rodamiento de bolas simple donde se apoya la propia bola de bruñido de diámetro 10 mm, que se encarga de transmitir la fuerza que produce la deformación plástica de los picos de la superficie.

Esta herramienta base fue ligeramente modificada para poder adaptarla a torno, mediante la fabricación de un adaptador para el portaherramientas de la máquina (figura 2a). Por otro lado, se introdujo una segunda modificación del diseño geométrico para poder instalar en la punta de la herramienta una bola de diámetro 6 mm que permitiera bruñir las probetas de fatiga, tal y como se explicará en el siguiente subapartado. Para ello, se

mecanizó en el taller un nuevo vástago con un carril para bolas de diámetro 2 mm que sirvieran de rodamiento, y sobre las que se apoya la bola de 6 mm para ejecutar el proceso.

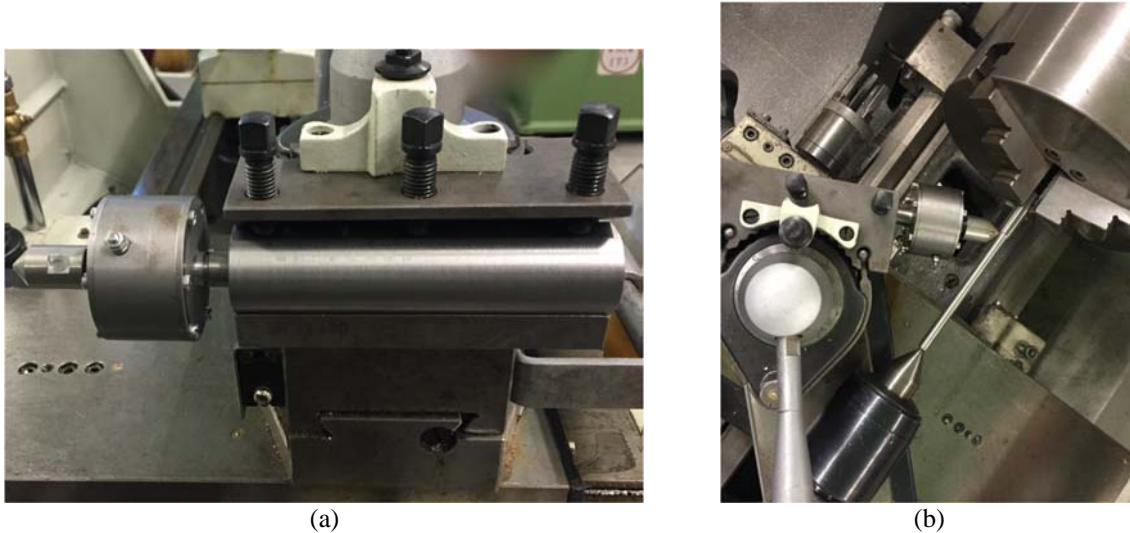


Figura 2: Ensamblaje del conjunto herramienta y portaherramienta en el torno. (a) Vista general. (b) Vista superior donde se puede ver el proceso de bruñido del radio de acuerdo de las probetas.

2.2. Descripción de los ensayos de fatiga

Las probetas para la ejecución de los ensayos de fatiga fueron mecanizadas a partir de barras calibradas de 12 mm de diámetro de acero AISI 1035, fabricadas a través de un proceso de laminado. Las probetas se mecanizaron a una longitud de 146 mm, y se redujo el diámetro de uno de sus extremos a 8 mm, con un radio de acuerdo entre las dos secciones del cilindro de 3,5 mm. Esta probeta fue expresamente para la máquina de ensayos de fatiga disponible con dimensiones aptas para hacer viable el bruñido exacto sobre el área de concentración de tensiones con la herramienta de bola disponible (figura 2b).

Para ejecutar los ensayos, se empleó una máquina para ensayo a fatiga por flexión rotativa GUNT WP 140. Esta máquina permite regular y aplicar una fuerza vertical sobre el punto extremo de la probeta, al mismo tiempo que un motor de 0,37 kW hace girar la probeta a 2800 min^{-1} , generando así una tensión originada por un momento flector variable en el tiempo.

Para la elaboración de las curvas de Wöhler, se ensayaron las diferentes probetas aplicando fuerzas puntuales de 180 N, 190 N, 200 N, 210 N, 220 N y 230 N, que serían transformadas posteriormente a tensión mediante la ecuación (1), teniendo en cuenta la geometría circular de la sección de la probetas.

$$\sigma_{Mf} = \frac{32M_f}{n \cdot d^3} \quad (1)$$

donde M_f es el momento flector aplicado en cada sección de la probeta, y d es el diámetro de la misma.

Tabla 1: Correspondencia entre la fuerza externa aplicada, momento flector y tensión de las probetas de ensayo.

Fuerza (N)	M_f (N·m)	σ_{Mf} (MPa)
180	18,09	360
190	19,10	380
200	20,10	400
210	21,11	420
220	22,11	440
230	23,12	460

Se ensayaron probetas en tres condiciones diferentes, a saber: sin bruñir, bruñidas con 90 N y una pasada y cinco pasadas. Para cada condición, y cada nivel de fuerza, se efectuaron seis repeticiones de cada experimento, tal y como se recomienda en Lee et al. para estudios preliminares de fatiga (2005:109) [13]. Para cada curva se realizaron, pues, un total de 36 ensayos.

3. Resultados

3.1. Curvas de Wöhler

Las curvas de Wöhler para las tres condiciones de tratamiento de la probeta han sido representadas en la figura 3. Los puntos que conforman las curvas para cada nivel de tensión y cada condición de bruñido representan la media aritmética de las seis repeticiones efectuadas para cada combinación. Como puede observarse, las características del ensayo, aplicando fuerzas en el rango seleccionado para este estudio de tipo preliminar, y la geometría de las probetas diseñadas, las curvas de Wöhler resultantes muestran que el análisis se enmarca a un régimen de trabajo de fatiga a altos ciclos (lo que se conoce con el término anglosajón de *high cycle fatigue*, HCF). En efecto, en todas las probetas ensayadas, y para todos los niveles de tensión impuesta por momento flector, los ciclos a rotura son superiores a 10^3 .

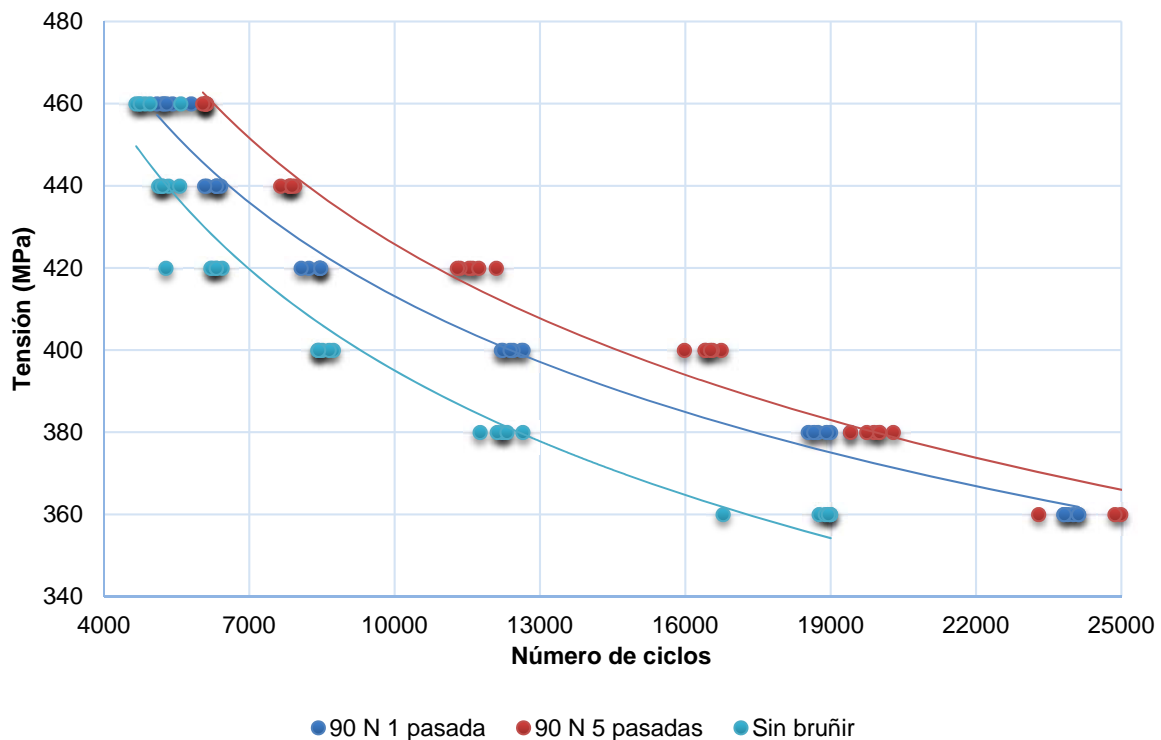


Figura 3: Curvas S-N de las probetas ensayadas.

Las ecuaciones de las curvas S-N están indicadas en la tabla 2. Estas ecuaciones han sido obtenidas por regresión por mínimos cuadrados, y revelan una alta consistencia de los resultados obtenidos, al tener coeficientes de correlación muy próximos al 100%. En este sentido, el bruñido se muestra como una tecnología válida para el aumento de la vida a fatiga de aceros similares al empleado para este artículo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que para estos experimentos sólo se ha bruñido la probeta en el área de la zona de acuerdo entre sus dos secciones principales, y por tanto se han eliminado del análisis factores como la rugosidad superficial, que influye también en la vida a fatiga de las piezas.

Tabla 2: Curvas de fatiga obtenidas por regresión por mínimos cuadrados.

Condiciones	Curva fatiga	R ²
Sin bruñir	$S=1889,5 \cdot N^{-0.17}$	94,8%
90 N, 1 pasada	$S=1654 \cdot N^{-0.151}$	98,6%
90 N, 5 pasadas	$S=1950 \cdot N^{-0.165}$	97,8%

De los resultados obtenidos, puede verse en primer lugar que el bruñido del radio de acuerdo de las probetas tratadas aumenta la vida a fatiga de las mismas de manera considerable, siendo esta mejora más visible para un mayor tiempo de bruñido o número de pasadas equivalentes. Este resultado tiene sentido si se tiene en cuenta que cuanto más tiempo se mantenga la herramienta en contacto con el material, mayor es el trabajo de deformación en frío de su superficie, y menor la probabilidad de que se inicien grietas de fatiga en las probetas. Así, el aumento de la vida a fatiga puede ser atribuido al hecho de que el material comprimido prevenga que los esfuerzos de

tracción que permiten la propagación de la grieta permitan dicho mecanismo [14]. Por otro lado, el tiempo de exposición y la fuerza aplicada parecen ser suficientemente bajos como para que no se produzca un efecto adverso en la superficie, dañándola, y fomentando en consecuencia el efecto contrario al deseado. Este efecto adverso ha sido observado en algunos casos en los que los parámetros de bruñido han ido en detrimento de la integridad superficial de las probetas, actuando como microconcentradores de tensión, y contribuyendo negativamente a su vida a fatiga [6].

4. Conclusiones

En este artículo se han llevado a cabo unos sencillos experimentos para aproximarse a la influencia del bruñido en la vida a fatiga de probetas de acero al carbono ASI 1038. En vista de los resultados analizados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1) La vida a fatiga de probetas de acero AISI 1038 se ha visto aumentada al bruñir el área prevista de rotura con una fuerza de 90 N. Por tanto, puede decirse que aplicando fuerzas de bruñido relativamente bajas, puede obtenerse una mejora significativa de la vida a fatiga.
- 2) El aumento del trabajo de deformación en frío de las piezas permite alargar su vida a fatiga. En este artículo, se consiguió este aumento mediante un mayor tiempo de contacto de la herramienta con la zona bruñida, o lo que es lo mismo, aumentando el número de pasadas de la operación.
- 3) Los resultados estadísticos de las curvas de fatiga obtenidas permiten afirmar que el bruñido es un proceso suficientemente consistente como para aumentar la vida a fatiga de manera fiable.

Con estos resultados, se concluye que es de interés analizar la influencia del bruñido sobre la vida a fatiga, y abren la puerta a llevarse a cabo un mayor número de ensayos cubriendo un rango más amplio de parámetros de bruñido.

5. Referencias

- [1] J. A. Travieso-Rodríguez, G. Desein, H. A. González-Rojas. Improving the surface finish of concave and convex surfaces using a ball burnishing process. *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 12 (2011), 1494-1502.
- [2] F. J. Shiou, C. H. Chen. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 1 (2003) 248-254.
- [3] A. M. Hassan, A. S. Al-Bsharat. Improvements in some properties of non-ferrous metals by the application of the ball-burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology* 59, 3 (1996), 250-256.
- [4] P. S. Prevey, J. Cammett. Low cost corrosion damage mitigation and improved fatigue performance of low plasticity burnished 7075-T6. *Journal of Materials Engineering and performance* 10, 5 (2001), 548-555.
- [5] C. Seemikeri, P. Brahmkar, S. Mahagaonkar. Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool. *Tribology International* 41, 8 (2008), 724-734.
- [6] R. Aviles, J. Albizuri, A. Rodriguez, L. N. López de la Calle. Influence of low plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue* 55 (2013), 230-244.
- [7] G. Majzoobi, K. Azadikhah, J. Nemati. Effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of aluminum-7075-T6. *Materials Science and Engineering: A*. 516, 1 (2009), 235-247.
- [8] P. S. Prevéy. The effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced IN718. (2000) LAMBDA RESEARCH CINCINNATI TECHNICAL REPORT.
- [9] I. Altenberger, R. K. Nalla, Y. Sano, L. Wagner, R. O. Ritchie. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low-and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550°C. *International Journal of Fatigue* 44 (2012), 292-302.
- [10] G. Gómez-Gras, J. A. Travieso-Rodríguez, H. A. González-Rojas, A. Nápoles-Alberro, F. J. Carrillo, G. Desein. Study of a ball-burnishing vibration-assisted process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229, 1 (2014), 172-177.
- [11] J. A. Travieso-Rodríguez, G. Gómez-Gras, J. Jorba-Peiró, F. Carrillo, G. Desein, J. Alexis, H. G. Rojas. Experimental study on the mechanical effects of the vibration-assisted ball-burnishing process. *Materials and Manufacturing Processes*, 30, 12 (2015), 1490-1497.

- [12] J. A. Travieso-Rodriguez, G. Gomez-Gras, G. Dessen, F. Carrillo, J. Alexis, J. Jorba-Peiro, N. Aubazac. Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 9-12 (2015), 1757-1765.
- [13] Lee et al. *Fatigue testing and analysis*, Ed. Elsevier (2015). ISBN: 0750677198.
- [14] T. Nicholas. Critical issues in high cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 21, (1999), S221-S231.