

Observación a simple vista del crecimiento de grietas microestructuralmente pequeñas.

P. Lorenzino⁽¹⁾, A. Navarro Robles⁽¹⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del Sevilla
navarro@us.es

Este trabajo presenta una técnica experimental mediante la cual es posible observar a simple vista las interacciones de grietas pequeñas con las barreras microestructurales y su consecuente cinética de propagación no uniforme. El procedimiento experimental consiste en la aplicación de una serie de tratamientos térmicos y mecánicos a una aleación de aluminio Al1050 que permiten la obtención de una microestructura con tamaño de grano del orden del centímetro. Una vez obtenida dicha microestructura, los granos son revelados y luego se realiza una entalla circular con el fin de localizar el origen de la grieta. Finalmente se ensayan los especímenes a fatiga bajo carga axial (Modo I) con $R=0,1$. Las variaciones en la velocidad de crecimiento de grieta debido a la interacción con la microestructura así como el ángulo de inclinación y giro del plano de la grieta en los bordes de grano o el anclaje o la ramificación de las mismas pueden ser observados sin requerir el uso de ninguna técnica de microscopía.

Se realizaron ensayos variando el tamaño de grano y el diámetro de la entalla observándose el mismo patrón de comportamiento en el crecimiento de grieta. Las diferencias encontradas en la vida a fatiga teniendo en cuenta la variación del tamaño de grano son consistentes con lo que predice la teoría de Hall-Petch. El comportamiento de estas grietas microestructuralmente pequeñas es similar al observado en otros trabajos experimentales, en los que se trabajan con especímenes y microestructuras de mucho menor tamaño.

1. INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones industriales los componentes estructurales se encuentran sometidos a cargas cíclicas cercanas al límite de fatiga del material. En este caso la vida a fatiga se encuentra determinada por la iniciación y propagación de grietas microestructuralmente pequeñas. Debido a la fuerte interacción entre dichas grietas y las barreras microestructurales del material (inclusiones, bordes de grano, etc.) presentan una cinética de propagación no uniforme, en comparación con la velocidad de crecimiento de grietas grandes. Existen en la actualidad varios modelos que describen este comportamiento [1, 2]. La mayoría basados en los trabajos de Bilby, Cottrell y Swinden [3] El objetivo de este trabajo consiste desarrollar una técnica experimental simple que permita en caracterizar el comportamiento de microgrietas creciendo por fatiga desde una entalla circular y bajo cargas axiales (modo I). El aspecto novedoso del presente estudio consiste en la realización de ensayos en los que se emplean probetas con tamaño de grano en el orden del centímetro y a través de los cuales posible evaluar la influencia de la microestructura sin la ayuda de ninguna técnica de microscopía.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental se encuentra dividido en dos etapas. La primera consiste en la implementación de una serie de tratamientos termomecánicos sobre probetas de aluminio que permitan la obtención de una microestructura de tamaño de grano del orden

centimétrico; y una segunda etapa de estudio del comportamiento de las grietas microestructuralmente pequeñas creciendo por fatiga bajo carga en modo I.

2.1. Tratamiento termomecánico

A partir de los trabajos [5, 6, 7] de Constance Elam, la colaboradora de G.I. Taylor en sus trabajos de plasticidad de metales, sobre preparación de monocristales de aluminio, se ha comprobado la posibilidad de conseguir hacer crecer suficientemente el tamaño de grano de un aluminio comercialmente puro en chapas delgadas mediante una combinación de dos tratamientos térmicos y una deformación en frío intermedia. El proceso es suficientemente simple y controlable obteniendo resultados muy poco dispersos.

Se trabaja con aluminio 1050 Puraltok 99,5-H24 de la compañía Alu-Stock s.a., provisto en chapas de 4,0 mm. de espesor. Composición química: Mn: 0.002; Si: 0.070; Zn: 0.001; Fe: 0.310; Ti: 0.015; Mg: 0.01; Al balance. Las chapas de aluminio se cortan en pletinas de 45 x 300 mm. en sentido paralelo a la dirección de laminación. Para los tratamientos térmicos se utiliza un horno tubular marca Carbolite modelo 215GHA12. La finalidad del primer tratamiento térmico es obtener una estructura equiaxial y libre de deformación; se probaron diversos tratamientos, cambiando la temperatura de recristalización, la velocidad de calentamiento y el intervalo a temperatura constante. Luego de observar las microestructuras obtenidas se optó por una rampa de calentamiento de 2,6 °C/min desde temperatura ambiente hasta 550 °C. Mantener la temperatura constante durante 5 horas y posterior enfriamiento en aire. Si aumenta el tiempo de permanencia a temperatura se produce un mayor crecimiento de los granos superficiales respecto a los del interior y este gradiente en el tamaño de grano a lo largo del espesor de la probeta provoca que en la siguiente etapa (tratamiento mecánico) la deformación sea no uniforme a lo largo del espesor.

A continuación se realiza la deformación en frío en una maquina de ensayos MTS 810. El grado de deformación aplicado en esta etapa es la variable determinante del tamaño de grano resultante luego de la segunda recristalización.

La tercer etapa consiste en una rampa de temperatura de T_{amb} hasta $T=550$ °C de 2,6 °C/min; mantener la temperatura constante durante 15 horas para luego aumentar nuevamente la temperatura hasta 590 °C y mantener durante 1 hora. Finalmente se enfría en aire. En esta etapa se forman los nuevos cristales que crecen a expensas de los antiguos. El tamaño final obtenido depende esencialmente del nivel de deformación plástica introducido. La figura 1 muestra un ejemplo de las microestructuras que es posible obtener y el correspondiente nivel de deformación total aplicado. El proceso posee la repetitividad necesaria para poder obtener un número de probetas acorde con los ensayos de fatiga que se pretende realizar.

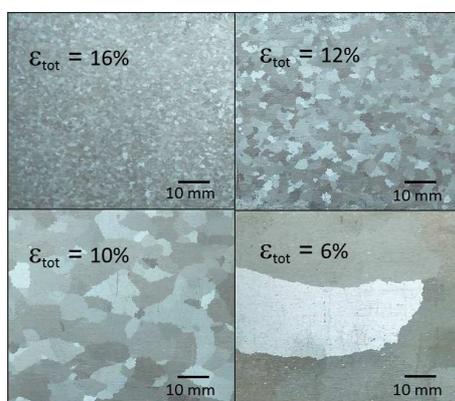


Figura 1. Distintos niveles de deformación total aplicada durante el tratamiento mecánico y la microestructura obtenida

2.2. Preparación y acondicionamiento de las probetas

Una vez realizado el TTM se atacan las probetas para revelar la microestructura. Se emplea una solución 6% V/V de ácido fluorhídrico a 50 °C y saturada con óxido de molibdeno. Esta solución tiene una vida útil de 24 horas y el ataque debe realizarse por inmersión completa durante 30 segundos. Al retirar las probetas los granos del material se observan a simple vista. En caso de ser necesario, se puede optar por una segunda inmersión de 15 segundos. El acabado superficial de las chapas laminadas hace innecesario una etapa previa de pulido. La medición del tamaño de grano se realiza, tal como muestra la figura 2, tomando una fotografía de la probeta, marcando los bordes de grano y finalmente utilizando el software libre de análisis de imágenes Simagis Live. El gráfico 3 muestra el tamaño de grano obtenido en función del grado de deformación plástica aplicada durante el tratamiento mecánico.

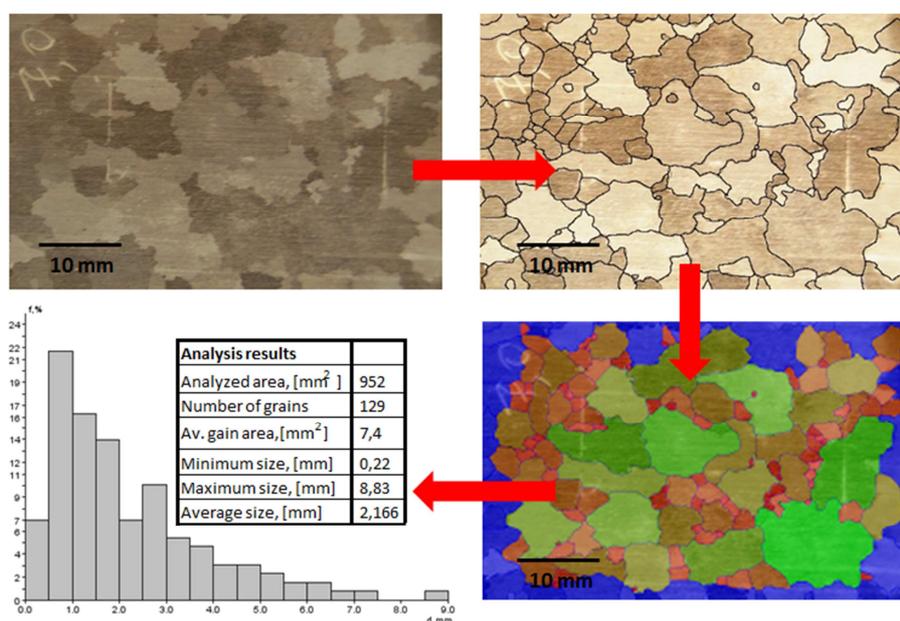


Figura 2. Esquema del proceso de medición del tamaño de grano

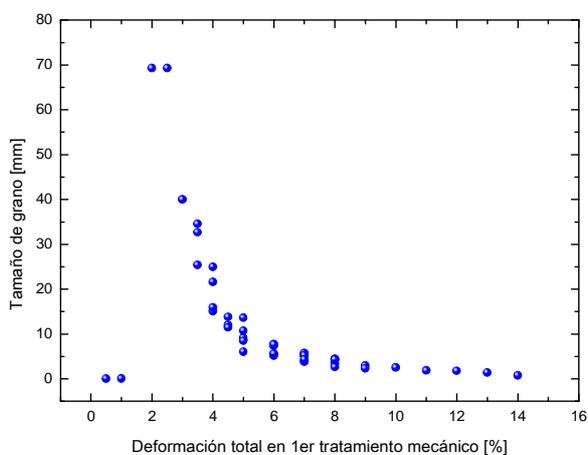


Figura 3. Tamaño de grano del material luego del TTM en función del grado de deformación total alcanzado en el tratamiento mecánico. Para niveles de deformación inferiores al 2% no se observa crecimiento

Los ensayos de fatiga son realizados en tensión uniaxial, con $R=0,1$ y con tensiones máximas en el rango de 50 a 70 MPa. Pero el material obtenido luego del TTM, tiene un límite de fluencia en el rango 12-18 MPa, dependiendo del tamaño de grano (figura 4). Es debido a esto que el siguiente paso consiste en realizar un nuevo tratamiento mecánico de deformación, controlando por deformación y alcanzando el valor de 15% de deformación total. De este modo los ensayos de fatiga son realizados en régimen elástico.

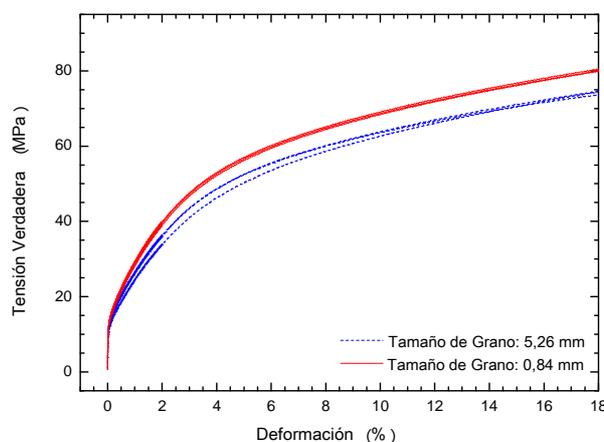


Figura 4. Tensión verdadera vs. deformación para dos tamaños de grano distintos

2.3. Ensayos de fatiga y seguimiento de grieta

Para los ensayos de fatiga se utiliza una máquina de resonancia RUMUL Testronic 100kN. Se trabaja en tensión uniaxial, con $R=0,1$ y con tensiones máximas en el rango de 50 a 70 MPa. La frecuencia de resonancia de la máquina bajo estas condiciones de carga y geometría de probeta oscila entre 70 y 80 Hz. El seguimiento del crecimiento de grieta se realiza mediante la adquisición de video en ambas caras de la probeta. El equipo de adquisición de imagen consiste básicamente en dos cámaras de video conectadas a un ordenador ya que el fenómeno es observable a simple vista. Al no ser necesarias grandes magnificaciones y al trabajar con niveles de carga bajos; el desplazamiento de la entalla y la grieta durante la carga y descarga del material es casi imperceptible con lo que el video es estático, lo que facilita mucho el análisis de imagen.

Una vez concluido el ensayo se extraen fotos del video adquirido a intervalos regulares de tiempo (30 segundos) y con el software libre de análisis de imagen ImageJ se calcula la longitud de grieta.

3. RESULTADOS

3.1. Tratamiento termomecánico

Una vez encontrado un tratamiento térmico conveniente, se llevaron a cabo distintos tratamientos mecánicos, fijando los porcentajes de deformación total en 1,2,3,...,20% y

de este modo se obtuvo la curva de tamaño de grano en función del tratamiento mecánico (figura 3). Para deformaciones inferiores al 2% no se produce crecimiento de grano y para deformaciones superiores a este valor observa un decaimiento exponencial del tamaño de grano, cuyo máximo se encuentra justamente en el valor crítico de 2%. Los valores de tamaño de grano medidos entre 2 y 6% poseen mayor dispersión que puede ser atribuible al hecho de que como se trata de granos de gran tamaño, no se cuenta con la cantidad de granos necesaria para que la medición sea representativa. La norma ASTM E112-96 de medición de tamaño de grano aconseja medir por lo menos 50 granos por campo, y en los casos de granos grandes no es alcanzado. Para deformaciones de más de 6% los resultados son muy poco dispersos. Es por este motivo que se decide realizar los ensayos de fatiga con probetas deformadas 8, 11 y 14% que corresponden a tamaños de granos de 5,26; 2,07 y 0,84 mm.

3.2. Ensayos de fatiga y seguimiento de grieta

A modo de ejemplo, la figura 5 muestra una imagen extraída del video de uno de los ensayos en el que se observan las grietas creciendo en ambas caras de la misma probeta (foto izquierda, cara A; foto derecha, cara B). La cara B se encuentra invertida de modo que las grietas de la derecha (o izquierda) pertenecen al mismo lado de la probeta. El tamaño de grano es de 0,84 mm. y la entalla es circular de 2 mm. de diámetro. Las condiciones del ensayo son $R=0,1$; tensión máxima 60 MPa y frecuencia de resonancia 76,65 Hz.



Figura 5. Grietas creciendo desde una entalla circular de 2 mm. de diámetro. Se observan los cambios de dirección del plano de la grieta y ramificaciones

En el video es posible observar los sucesivos bloqueos del vértice de la grieta así como también los cambios de dirección del plano por el que avanza. Extrayendo fotos a intervalos regulares de tiempo y midiendo la longitud de grieta es posible calcular la longitud de cada grieta en función del número de ciclos (figura 6). Al graficar la velocidad de avance en función del número de ciclos se observa el patrón esperado de aceleración y desaceleración de cada una de las grietas. Resulta importante destacar que esta técnica permite la observación simultánea de todas las grietas que se encuentran creciendo. Esto permite observar no solo la cinética de cada una sino también la interacción entre ellas. En la figura 7 se puede ver como en las primeras etapas del crecimiento de grieta (vida inferior a 10^6 ciclos) la aceleración de una u otra grieta esta relacionada con la desaceleración de las restantes.

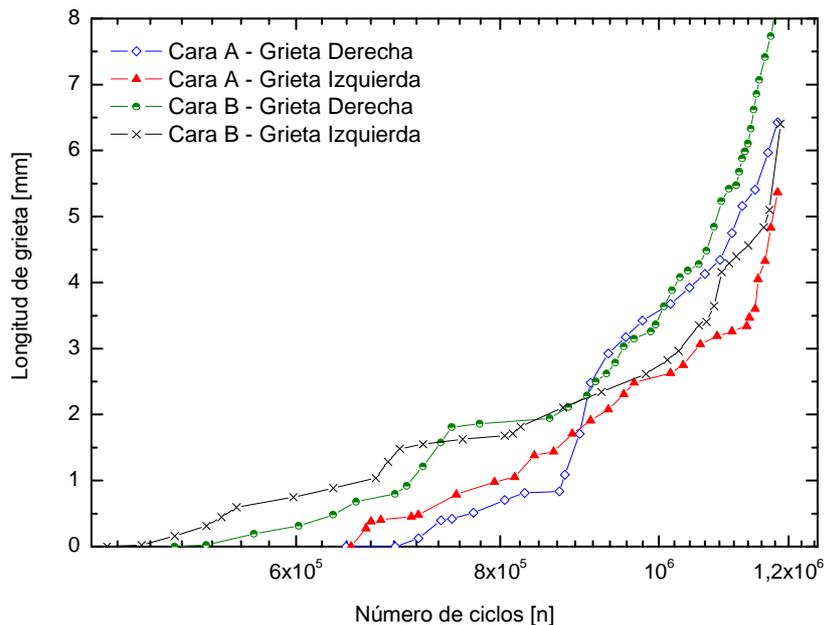


Figura 6. Longitud de las grietas en función del número de ciclos. La grieta Derecha II es una grieta no propagante

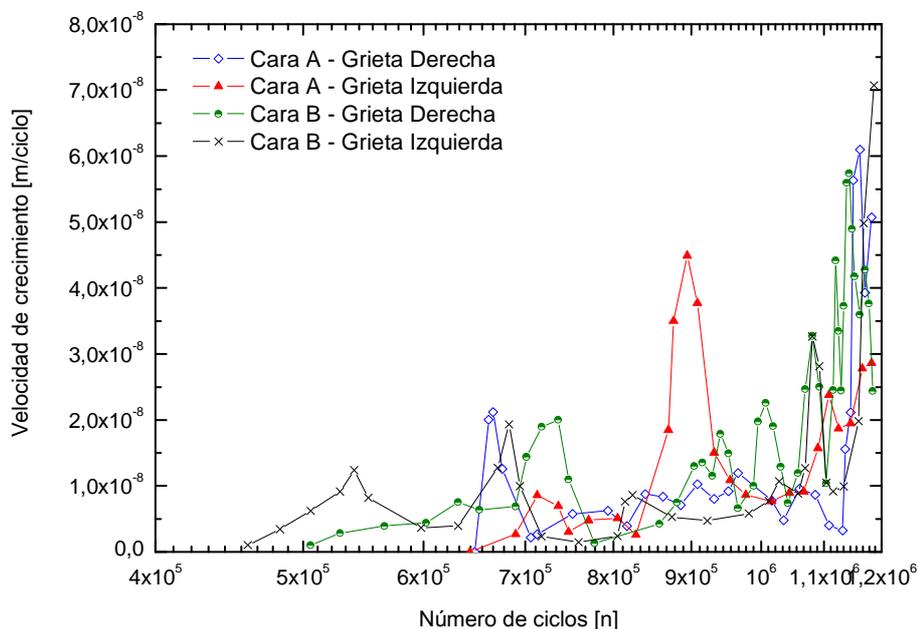


Figura 7. Velocidad de crecimiento en función del número de ciclos. La grieta Derecha II es una grieta no propagante

En la figura 8 se compara la velocidad de crecimiento de la grieta para tamaños de grano de 5,26 mm. y 0,84 mm. Se aprecia como el espaciamento entre los valores de velocidad

mínima de crecimiento (bloqueos sucesivos del vértice de grieta), es consistente con el tamaño de grano del material.

Se realizaron ensayos variando el tamaño de grano y el diámetro de la entalla (1, 2 y 4 mm.), observándose el mismo patrón de comportamiento en el crecimiento de grieta. Las diferencias encontradas en la vida a fatiga son consistentes con lo que predice la teoría de Hall-Petch [8]. El comportamiento de estas grietas microestructuralmente pequeñas es similar al observado en otros trabajos experimentales, en los que se trabajan con especímenes y microestructuras de mucho menor tamaño [4, 9-12].

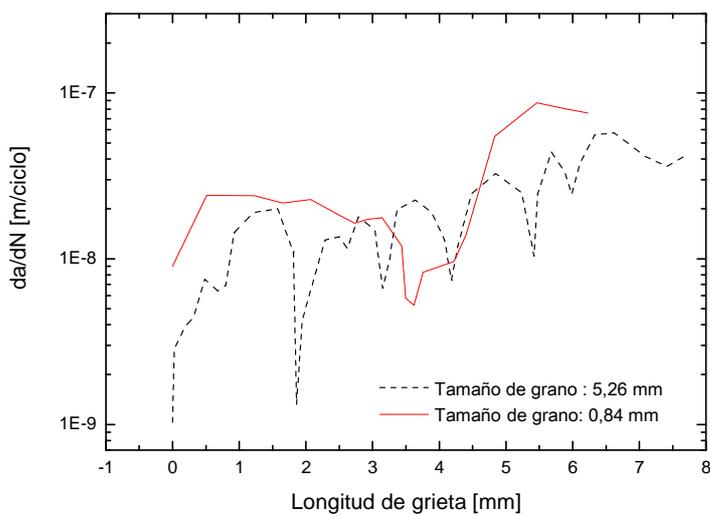


Figura 8. Velocidad de crecimiento en función la longitud de grieta para tamaños de grano de 5,26 mm. y 0,84 mm.

4. CONCLUSIONES

- El tratamiento termomecánico es suficientemente simple y controlable, obteniendo resultados muy poco dispersos. Esto facilita la elaboración de un elevado número de probetas de gran similitud que serán empleadas en estudios de comportamiento a fatiga de materiales entallados con una relación tamaño de entalla - microestructura mucho más pequeña que la estudiada hasta el momento.
- El montaje experimental para llevar a cabo el seguimiento de grieta es sencillo y los ensayos son fácilmente realizables.
- Esta técnica permite estudiar la interacción de grietas pequeñas con la microestructura y también evaluar la interacción entre las múltiples grietas creciendo desde una misma entalla.
- Con los resultados obtenidos hasta el momento es posible decir que el comportamiento de grietas microestructuralmente pequeñas observado mediante este procedimiento es similar al observado cuando se trabaja con microestructuras más pequeñas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al profesor D. Javier Belzunce por sus sugerencias sobre el procedimiento para el crecimiento de grano. También les gustaría

agradecer el apoyo financiero recibido del Ministerio de Educación y Ciencia de España mediante el proyecto DPI2008-01100 y DPI2011-27019 y a la Junta de Andalucía mediante el proyecto P07-TEP-03045.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Navarro, E. R. de los Ríos *Short and Long Fatigue Crack Growth: a Unified Model*, Phil Mag, 57 (1988), 15-36.
- [2] A. Navarro, E. R. de los Ríos *Fatigue Crack Growth Modelling by Successive Blocking of Dislocations*, Proceedings of R. Soc. Lond. A, 437 (1992), 375-390.
- [3] B.A. Bilby, A.H. Cottrell, K.H. Swinden, F.R.S. Swinden *The spread of plastic yield from a notch*, Proceedings of the Royal Society of London 272 (1962), 304-314
- [4] O. Düber, B. Künkler, U. Krupp, H-J. Christ, C-P. Fritzen *Experimental characterization and two-dimensional simulation of short crack propagation in an austenitic-ferritic duplex steel*. Int J Fatigue 28 (2006), 983-992.
- [5] H.C.H. Carpenter, C. F. Elam *Crystal Growth and Recrystallization in Metals*, Journal of the Institute of Metals, 24 (1920), 83-131.
- [6] H.C.H. Carpenter and C. F. Elam *The production of Single Crystals of Aluminium and their Tensile Properties*, Proc. Roy. Soc. A, 704 (1921), 329-353.
- [7] C. F. Elam *Distortion of Metal Crystals*, Oxford University Press, (1935).
- [8] E.O.Hall *The Deformation and Ageing of Mild Steel- III Discussion of Results* Proc Phys Soc London B (1951), 64:747.
- [9] M. Herbig, A. King, P. Reischig, H. Proudhon, E.M. Lauridsen, J. Marrow, J.Y. Buffière *3-D growth of a short fatigue crack within a polycrystalline microstructure studied using combined diffraction and phase contrast X-ray tomography*, Acta Materialia 59 (2011), 590-601.
- [10] I. Roth, M. Kübbeler, U. Krupp, H-J. Christ, C-P Fritzen *Crack initiation and short crack growth in metastable austenitic stainless steel in the high cycle fatigue regime*, Procedia Engineering 2 (2010), 941-948.
- [11] W. Schaefer, M. Marx, H. Vehoff, A. Heckl, P. Randelzhofer *A 3-D view on the mechanisms of short fatigue cracks interacting with grain boundaries*, Acta Materialia 59 (2011), 1849-1861.
- [12] M. Klein, A. Hadrboletz, B. Weiss, G. Khatibi *The 'size effect' on the stress-strain, fatigue and fracture properties of thin metallic foils*, Materials Science and Engineering A 319-321 (2001), 924-928.