



Departament de Ciència dels
Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Tesis Doctoral

Comportamiento Mecánico de Aceros Sinterizados de Alta Densidad

Jorge Luis Bris Cabrera

Tesis presentada para optar al grado de Doctor
por la Universitat Politècnica de Catalunya

Dirigida por el Prof. Luis Miguel Llanes Pitarch

Barcelona, Diciembre 2006

Capítulo VI. Conclusiones

El estudio realizado sobre el comportamiento mecánico de una aleación con composición química Fe-4,0Ni-1,5Cu-0,5Mo en el rango de alta densidad, ha permitido llegar a las conclusiones que a continuación se presentan.

VI.1. EFECTO DEL PROCESAMIENTO SOBRE LA DENSIDAD Y LA MICROESTRUCTURA

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen en evidencia la influencia que ejercen las condiciones de procesamiento en la densidad alcanzada y las características microestructurales de los materiales estudiados. Acto seguido, se exponen las conclusiones más relevantes desde este punto de vista.

- a) El nivel de densidad deseado en una pieza pulvimetalúrgica se puede controlar con la variación en las condiciones de procesamiento. Aumentando la temperatura de compactación se facilita la deformación plástica de las partículas del polvo, y por tanto, se obtiene una mejor densificación final. Por su parte, un incremento en la temperatura de sinterización, acompañado de un mayor tiempo de procesado, promueve una mejor difusión de los elementos de aleación.
- b) La doble compactación y doble sinterización produce un incremento promedio en la densidad del material de $0,20 \text{ g/cm}^3$ en comparación a la obtenida

mediante el procesamiento basado en rutas simples. Otra alternativa para incrementar la densidad consiste en precalentar los polvos antes de la compactación. Combinando las dos técnicas antes mencionadas se pueden alcanzar niveles de densidad próximos a $7,50 \text{ g/cm}^3$.

- c) El aumento en densidad obtenido a través de las diferentes rutas de procesamiento está acompañado de variaciones en las características de la porosidad. En este contexto, no sólo se reduce la fracción volumétrica de poros, sino que el tamaño de éstos disminuye mientras que se aumenta la separación entre los mismos. En consecuencia el tamaño de los cuellos de sinterización se hace mayor cuanto más elevada es la densidad en la pieza.
- d) La microestructura resultante después de la sinterización es altamente heterogénea. Como resultado de la naturaleza del polvo base, el cual es prealeado por difusión, y la incompleta difusión del Ni y su efecto estabilizador de la fase austenítica, la microestructura exhibe una matriz constituida por martensita y austenita, ricas en Ni, y colonias de perlita y bainita, dentro de las cuales se puede encontrar, en algunos casos, granos de ferrita. La matriz es continua a lo largo del material, y en ella se encuentran embebidos los poros más críticos. Por su parte, las colonias de ferrita, perlita y bainita se ubican en el núcleo de las partículas originales del polvo, en donde la presencia de Ni es escasa.
- e) El aumento de la temperatura de sinterización de 1120°C a 1250°C produce un redondeo de los poros, el cual se ve reflejado en un mayor factor de forma y convexidad de los mismos. Por su parte, la microestructura sufre algunas alteraciones, aunque cualitativamente secundarias en términos mecánicos, tales como la desaparición de los granos de ferrita y el descenso de la cantidad de austenita en la matriz. Asimismo, la cantidad de fase bainítica, en algunos casos de tipo nodular, aumenta en detrimento de la martensita presente en la matriz.
- f) La caracterización mecánica realizada por medio de nanoindentación de las diferentes fases presentes en la microestructura permitió identificar

diferencias significativas entre éstas. Los resultados obtenidos tanto para el módulo de elasticidad como para la dureza de cada fase señalan a la austenítica y martensítica, correspondientes a la matriz de la microestructura, como las de mayor dureza y rigidez, mientras que la ferrita exhibe los resultados más bajos. Por su parte, la perlita fina y la bainita presentan un comportamiento intermedio, aunque próximo al exhibido por la ferrita. Dada la distribución relativa de la porosidad en las diferentes fases constituyentes, estos resultados permiten inferir que los poros están rodeados de las fases con mayores prestaciones mecánicas.

- g) Finalmente se debe destacar que, a pesar de la heterogeneidad de la microestructura de este tipo de materiales, se han podido identificar tendencias similares tanto en la morfología de los poros como en la distribución de las fases microconstituyentes a lo largo del intervalo de densidad estudiado. Por tanto, se podría decir que en términos microestructurales se ha evidenciado una heterogeneidad “ordenada”, la cual es relativamente independiente de la densidad de la mezcla.

VI.2. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD Y LA MICROESTRUCTURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

El análisis conjunto de los resultados arrojados por la evaluación de las propiedades mecánicas, tanto bajo cargas monotónicas como cíclicas, y por la caracterización microestructural de los materiales estudiados permiten establecer las conclusiones que se detallan a continuación.

- h) La caracterización mecánica ha permitido confirmar la marcada influencia de la densidad tanto en la respuesta esfuerzo-deformación del material como en su comportamiento a fractura y fatiga. En general, un aumento en la densidad produce una mejora de todas las propiedades mecánicas.
- i) Los resultados antes descritos no dependen de la ruta de procesamiento a través de la cual se obtiene la pieza. Es decir, a niveles de densificación similares, no es relevante (en términos de la respuesta mecánica) si la pieza

ha sido procesada por compactación en frío o con polvos precalentados o si ha sido fabricada por simple o doble sinterización.

- j) La presencia de poros en el material tiene dos efectos importantes, los cuales al ser analizados conjuntamente son la base para racionalizar la correlación entre la densidad y las propiedades mecánicas resultantes. Por una parte, la fracción volumétrica de poros determina la sección efectiva de material que soporta carga; mientras que por la otra, los poros actúan como microentallas internas alrededor de los cuellos de sinterización lo cual induce tanto concentración de tensiones como deformación plástica localizada. En consecuencia, al introducir poros en el material, la resistencia mecánica del material no sólo estará afectada por la reducción del área resistente sino por la concentración de tensiones localizada en los cuellos. Esto explica, entre otras cosas, el hecho que la variación observada en el límite elástico con la densidad sea mayor que la esperada si solo se tuviese en cuenta los cambios de área resistente. En este contexto, de cara a mejorar la resistencia mecánica del material, es deseable tener poros de menor tamaño, con mayor espaciamiento entre sí, y con geometría mas redondeada. La combinación de estos factores conlleva al engrosamiento de los cuellos de sinterización y un menor efecto interno de microentallas, reduciéndose así el nivel de tensiones localizadas en los cuellos.
- k) Al disminuir la densidad hasta niveles en los que los poros empiecen a interconectarse (alrededor de $7,0 \text{ g/cm}^3$), entonces el estado tensional de los cuellos tiende a la triaxialidad. Bajo estas condiciones y dado el carácter dúctil de los cuellos en los materiales aquí estudiados, se produce un endurecimiento del material (*notch strengthening*) a nivel local que de alguna manera compensa la pérdida de resistencia asociada a la menor área resistente y la concentración de tensiones que inducen los poros. Por consiguiente, la respuesta mecánica del material obedece a la interacción entre el área resistente efectiva (que es función de la cantidad total de porosidad), el efecto de concentración de tensiones que causan los poros (que depende de la geometría y distribución de los mismos) y la triaxialidad

que causan éstos en los cuellos, especialmente en presencia de porosidad interconectada, donde el efecto concentrador de los poros es mayor.

- l) A pesar de la baja ductilidad macroscópica exhibida por las mezclas investigadas en los ensayos de tracción, con valores en el rango de 2-4%, la fractografía ha permitido evidenciar gran cantidad de deformación plástica localizada en los cuellos, en términos de una presencia extendida de microcavidades. El hecho que la prominencia de esta ductilidad local se mantiene a medida que la densidad se incrementa permite explicar la correlación positiva encontrada entre la tenacidad de fractura y el límite elástico; comportamiento contrario al de los materiales macizos en los cuales el aumento de resistencia usualmente se asocia a una fragilización del material y por tanto a una reducción en su tenacidad.

- m) El límite a fatiga aumenta con la densidad del material, tanto en probetas lisas como entalladas. En ambos casos, este parámetro es del orden de un 24-29% de la resistencia a flexión monotónica. En consecuencia, la sensibilidad a la presencia de entallas se puede describir como relativamente constante a lo largo del intervalo de densidad estudiado, lo cual constituye una ventaja de estos materiales comparados con los macizos, en los cuales un aumento en la resistencia mecánica está asociado a una mayor sensibilidad a la existencia de concentradores.

- n) De igual importancia que lo anterior resulta ser el hecho de que la sensibilidad a la presencia de entallas, además de ser constante, presenta un valor bastante bajo (alrededor de 0,33). En comparación, los aceros macizos de aplicación estructural con prestaciones equivalentes a las de los materiales investigados exhiben una sensibilidad muy superior (del orden de 0,80). Estos resultados representan una característica importante de cara a la aplicación de los aceros sinterizados de alta densidad en piezas cuya geometría presente entallas (cambios de sección, orificios, etc.) y sometidas a solicitaciones cíclicas, como por ejemplo los engranajes.

- o) En los aceros investigados, el fallo por fatiga se inicia con la nucleación de una grieta mayoritariamente a partir de los poros más grandes e irregulares, donde el efecto concentrador de tensiones es más pronunciado. Posteriormente, la deformación plástica localizada permite que la grieta se propague a través de la rotura sucesiva de los ligamentos o cuellos, siguiendo preferencialmente las interfases microestructurales. Finalmente, la grieta sigue un camino tortuoso hasta alcanzar el tamaño crítico que conlleva a la rotura de la pieza.
- p) El estudio de la cinética de propagación de grietas ha permitido establecer que mientras el umbral de propagación de grietas grandes no presenta cambios significativos con la densidad, la velocidad de propagación si experimenta un aumento apreciable cuando la densidad disminuye. A mayor cantidad de poros, mayor tamaño de los mismos y menor separación entre ellos, y por consiguiente se facilita el avance de la grieta.
- q) Uno de los resultados más importantes de este trabajo refiere al comportamiento “anómalo” evidenciado en la propagación de fisuras pequeñas por fatiga. En este contexto, se ha podido comprobar que es posible la nucleación de grietas a partir de poros cuyo tamaño es inferior al tamaño crítico mínimo establecido por el umbral de grietas grandes. Por tanto, cualquier cálculo realizado teniendo en cuenta los resultados del estudio de fisuras grandes arrojaría resultados poco fiables. De acuerdo a los resultados obtenidos, se infiere que defectos de tamaño equivalente a los poros son suficientes para provocar la nucleación de grietas a niveles de tensiones del orden del límite de fatiga del material. En este orden de ideas, la propagación de las correspondientes microfisuras pasa a ser la etapa crítica en la definición del límite a fatiga de aceros sinterizados.
- r) La diferencia en los resultados obtenidos entre grietas grandes y pequeñas está relacionada con la existencia de fenómenos que involucran interacciones entre la fisura y la microestructura, que son dependientes del tamaño de la primera. Entre estos fenómenos destacan la deflexión de la grieta y el contacto entre sus caras, favorecido por la tortuosidad antes referenciada. La

microestructura altamente heterogénea, tanto en términos de la porosidad como de la distribución de fases, explica el continuo cambio de orientación de la grieta durante su propagación, y por tanto se presenta como uno de los aspectos que más beneficios aporta a la resistencia a fatiga de los aceros sinterizados aquí estudiados.

- s) Dado que los cuellos son las áreas de soporte de carga, también es necesario tener una adecuada microestructura que fortalezca dichas zonas. En el caso de los aceros sinterizados investigados, se ha observado que, a pesar de la heterogeneidad de la microestructura, la mayoría de los poros están inmersos en una matriz rica en Ni compuesta de la mezcla de fases martensítica, en mayor proporción, y austenítica. Estas fases se caracterizan por unas prestaciones mecánicas elevadas, como se ha comprobado en la caracterización por nanoindentación, y por tanto constituyen un refuerzo alrededor de los poros que dificulta la formación y/o propagación de grietas.

- t) Finalmente, se ha observado que los poros localizados en las interfases entre la matriz y las colonias perlita-bainita son las más perjudiciales puesto que las grietas se propagan con mayor facilidad a lo largo de dichas interfases, debido a la presencia de ferrita en estas últimas. Por su parte, en las interfases austenita-martensita toman lugar mecanismos de retardo en la propagación de grietas que en algunas ocasiones son suficientes para detener el crecimiento. En consecuencia, la presencia mayoritaria de martensita en la matriz, y su distribución alrededor de las zonas austeníticas y de las colonias de perlita y bainita, constituye una barrera microestructural que dificulta la propagación de fisuras, y por tanto es una característica deseable de cara a mejorar el comportamiento a fatiga en este tipo de materiales.

VI.3. TRABAJOS FUTUROS

Con el objetivo de complementar el trabajo realizado en esta tesis y profundizar en el estudio del comportamiento mecánico de aleaciones sinterizadas, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

- a) Extrapolar el estudio realizado en este trabajo a otras aleaciones metálicas de uso industrial, en el rango de alta densidad, a fin de comparar los resultados y establecer tendencias generales en los materiales PM.
- b) Evaluar el comportamiento mecánico de aceros sinterizados con microestructura heterogénea de cara a racionalizar la influencia de ésta sobre la respuesta a fractura y fatiga del material.
- c) Realizar ensayos de fatiga a relaciones de carga mayores con el propósito de cuantificar el efecto de la “tensión media” en el comportamiento a fatiga del material.
- d) Desarrollar el estudio de propagación de fisuras pequeñas en un intervalo de densidades más amplio que el analizado en este trabajo, así como determinar con mayor exactitud su umbral de propagación.
- e) Extender el estudio de la sensibilidad a la presencia de entallas utilizando nuevas configuraciones de probetas, mediante la variación del factor de concentración de tensiones y el modo de carga.
- f) Intentar eliminar la deformación plástica localizada en los cuellos mediante la aplicación de tratamientos termoquímicos a fin de determinar la influencia de dicha deformación en la correlación observada entre la densidad y el límite elástico del material.
- g) Validar los resultados obtenidos a nivel de laboratorio a través de la evaluación del comportamiento de piezas reales bajo condiciones similares (material, modo de carga, etc.) a las estudiadas aquí.
- h) Investigar la posibilidad de nuevas rutas de procesamiento por medio de las cuales se puedan alcanzar niveles de densidad superiores a $7,5 \text{ g/cm}^3$ a fin de evaluar si la correlación observada en este trabajo entre la densidad y las propiedades mecánicas se mantiene en la medida que el material se acerca al estado macizo.

Referencias Bibliográficas

ALZATI, L., BERGMARK, A. y ANDERSSON, J. 2005. *Microstructural reinforcement obtained by diffusion bonding*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 3 (2005) 10/125-10/134.

ANDERSON, O. y LINDQVIST, B. 1990. *Benefits of heterogeneous structures for the fatigue behaviour of PM steels*. Metal Powder Report, 45 (1990) 765-768.

ANGLADA, M., ALCALA, J., LLANES, L., MATEO, A., y SALAN, N. 2002. *Fractura de materiales*. Edicions UPC. Barcelona, España.

ASM. 1992. *Alloy phase diagrams*. Handbook Vol. 3. ASM International. Ohio, USA.

ASM. 1996. *Fatigue and fracture*. Handbook Vol. 19. ASM International. Ohio, USA.

ASTM B 528-99. 1999. *Standard test method for transverse rupture strength of metal powder specimens*. ASTM International. West Conshohocken, USA.

ASTM E8M-00. 2000. *Standard test method for tension testing of metallic materials*. ASTM International. West Conshohocken, USA.

ASTM E1820-01. 2001. *Standard test method for measurement of fracture toughness*. ASTM International. West Conshohocken, USA.

AVNER, S. 1988. *Introducción a la metalurgia física*. McGraw Hill. México D.F., México.

BEISS, P. 2005. *Principles of metal powder compaction*. Course Figures of PM Summer School EPMA (2005) 109-134.

BEISS, P. y DALGIC, M. 2001. *Structure property relationships in porous sintered steels*. Materials Chemistry and Physics, 67 (2001) 37-42.

BERG, S. y MAROLI, B. 2004. *Process route influence on performance of PM steels pre-alloyed with chromium*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 2 (2004) 7/41-7/49.

BERGMAN, O. 2003. *Chromium-alloyed PM steels with excellent fatigue properties obtained by different process routes*. Conference proceedings of EuroPM2003, 1 (2003) 317-323.

BERGMAN, O. y BERGMARK, A. 2003. *Influence of microstructure on the fatigue performance of PM steels*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 7 (2003) 270-278.

BERGMARK, A. y ALZATI, L. 2005. *Fatigue crack path in Cu-Ni-Mo alloyed PM steel*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 28 (2005) 229-235.

BLANCO, L., CAMPOS, M., TORRALBA, J. y KLINT, D. 2005. *Quantitative evaluation of porosity effects in sintered and heat treated high performance steels*. Powder Metallurgy, 48 (2005) 315-322.

BOCCHINI, G. 1998. *The warm compaction process: basics, advantages and limitations*. SAE Transactions, 107 (1998) 225-236.

BOCCHINI, G. 1999. *Warm compaction of metal powders: why it works, why it requires a sophisticated engineering approach*. Powder Metallurgy, 42 (1999) 171-180.

BOS, B., FORS, C. y LARSSON, T. 2006. *Industrial implementation of high velocity compaction for improved properties*. Powder Metallurgy, 49 (2006) 107-109.

CAMPOS, M. y TORRALBA, J. 2004. *Surface assessment in low alloy Cr-Mo sintered steel after heat and thermochemical treatment*. Surface & Coatings Technology, 182 (2004) 351-362.

CANDELA, N., VELASCO, F., MARTINEZ, M. y TORRALBA, J. 2005. *Influence of microstructure on mechanical properties of molybdenum alloyed P/M steels*. Journal of Materials Processing Technology, 168 (2005) 505-510.

CARABAJAR, S., VERDU, C. y FOUGÈRES, R. 1997. *Damage mechanisms of a nickel alloyed sintered steel during tensile test*. Materials Science and Engineering A232 (1997) 80-87.

CARABAJAR, S., VERDU, C., HAMEL, A. y FOUGÈRES, R. 1998. *Fatigue behaviour of a nickel alloyed sintered steel*. Materials Science and Engineering A257 (1998) 225-234.

CASALS, O. y ALCALA, J. 2005. *The duality in mechanical property extractions from Vickers and Berkovich instrumented indentation experiments*. Acta Materialia, 53 (2005) 3543-3561.

CASELLAS, D., NAGL, M., LLANES, L. y ANGLADA, M. 2003. *Fracture toughness of alumina and ZTA ceramics: microstructural coarsening effects*. Journal of Materials Processing Technology, 143-144 (2003) 148-152.

- CHAGNON, F., GELINAS, C. y TRUDEL, Y. 1994. *Development of high density materials for P/M applications*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 3 (1994) 199-206.
- CHAGNON, F. y TRUDEL, Y. 1995. *Effect of compaction temperature on sintered properties of high density P/M materials*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 5 (1995) 5/3-5/14.
- CHAGNON, F. y TRUDEL, Y. 2002. *Effect of copper additions on properties of 1.5% Mo sintered steels*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 13 (2002) 13/73-13/82.
- CHAWLA, N., BABIC, D., WILLIAMS, J. POLASIK, S., MARUCCI, M., y NARASIMHAN, K. 2002. *Effect of copper and nickel alloying additions on the tensile and fatigue behavior of sintered steels*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 5 (2002) 104-112.
- CHAWLA, N. y DENG, X. 2005. *Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels*. Materials Science and Engineering A390 (2005) 98-112.
- CHRISTIAN, K. y GERMAN, R. 1995. *Relation between pore structure and fatigue behaviour in sintered iron-copper-carbon*. International Journal of Powder Metallurgy 31 (1995) 51-61.
- COLLINS, J. 1993. *Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention*. John Wiley & Sons. New York, USA.
- COTTERELL, B., HE, SQ. y MAI, YW. 1994. *Fatigue of sintered steel*. Acta Metallurgica et Materialia, 42 (1994) 99-104.
- DANNINGER, H. y WEISS, B. 2003. *The influence of defects on high cycle fatigue of metallic materials*. Journal of Materials Processing Technology, 143-144 (2003) 179-184.
- D'ARMAS, H. 1999. *Comportamiento bajo cargas monotónicas y cíclicas de aleaciones sinterizadas Fe-C-Ni-Cu-Mo*. Tesis doctoral (1999) Universitat Politècnica de Catalunya.
- DEMPSEY, J., SHEKHTMAN, I. y SLEPYAN, L. 1998. *Closure of a through crack in a plate under bending*. International Journal of Solids and Structures, 35 (1998) 4077-4089.
- DIETER, G. 1988. *Mechanical metallurgy*. McGraw Hill. London, England.
- DIXON, W. y MOOD, A. 1948. *A method for obtaining and analyzing sensitivity data*. Journal of American Statistics Association, 43 (1948) 109-126.
- DOUIB, N., MELLANBY, I. y MOON, J. 1989. *Fatigue of inhomogeneous low alloy PM steels*. Powder Metallurgy, 32 (1989) 209-214.

- DRAR, H. 1995. *Fractographic aspects of fatigue of sintered Ni-steels*. Materials Characterization, 34 (1995) 129-141.
- DRAR, H. 1996. *Fracture mechanisms near threshold conditions of nickel alloyed PM steel*. Engineering Fracture Mechanics, 55 (1996) 901-917.
- DRAR, H. 2001. *Stages of fatigue fracture in nickel alloyed powder metallurgy steel*. Materials Science and Technology, 17 (2001) 1259-1264.
- ENDO, H. 2002. *Technology trends in sintered structural parts*. Hitachi Powdered Metals Technical Report, 1 (2002) 3-8.
- ENGSTROM, U. 2001. *Influence of sintering temperature on properties of low alloyed high strength P/M materials*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 7 (2001) 204-215.
- ENGSTROM, U. 2003. *Copper in P/M steels*. International Journal of Powder Metallurgy, 39 (2003) 29-39.
- ENGSTROM, U., LIPP, K. y SONSINO, C. 2001. *Influence of notches on fatigue strength of high performance PM materials*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 10 (2001) 1-9.
- ERICSSON, H. 2003. *Influence of notches on fatigue behaviour of PM steels*. Master's Thesis (2003) Lulea University of Technology.
- ESPER, F. y SONSINO, C. 1990. *Evaluation of heat treatment methods for fatigue design of PM parts*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (1990) 446-456.
- ESPER, F. y SONSINO, C. 1994. *Fatigue design for PM components*. EPMA. Shrewsbury, England.
- EUDIER, M. 1962. *The mechanical properties of sintered low-alloy steels*. Powder Metallurgy, 5 (1962) 278-290.
- EXNER, H. y POHL, D. 1978. *Fracture behavior of sintered iron*. Powder Metallurgy Intern., 10 (1978) 193-196.
- FLECK, N. y SMITH, R. 1981a. *Effect of density on tensile strength, fracture toughness and fatigue crack propagation behaviour of sintered steel*. Powder Metallurgy, 3 (1981) 121-125.
- FLECK, N. y SMITH, R. 1981b. *Use of simple models to estimate effect of density on fracture behaviour of sintered steel*. Powder Metallurgy, 3 (1981) 126-130.
- FÖLL, H. 2006. *Einführung in die Materialwissenschaft I*. Publicado en: http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/index.html.

- GANESAN, P., DOMSA, S. y BEISS, P. 2005. Fracture toughness of *PM alloy steels*. Powder Metallurgy, 48 (2005) 323-328.
- GERMAN, R. 1998. *Powder Metallurgy of Iron and Steel*. John Wiley & Sons. New York, USA.
- GETHING, B., HEANEY, F., KOSS, D. y MUELLER, T. 2005. *The effect of nickel on the mechanical behavior of molybdenum P/M steels*. Materials Science and Engineering A390 (2005) 19-26.
- GRAHAM, A., CIMINO, T., RAWLINGS, A. y RUTZ, H. 1997. *The effect of nickel content, sintering temperature and density on the properties of a warm compacted 0.85 w/o molybdenum prealloy*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 2 (1997) 13/75-13/94.
- GRIFFITHS, T., DAVIES, R. y BASSETT, B. 1979. *Analytical study of effects of pore geometry on tensile strength of porous materials*. Powder Metallurgy, 3 (1979) 119-123.
- HAYNES, R. 1971. *Effect of porosity content on the tensile strength of porous materials*. Powder Metallurgy, 14 (1971) 64-70.
- HAYNES, R. 1981. *The mechanical behaviour of sintered metals*. Freund Publishing. London, England.
- HADRBOLETZ, A. y WEISS, B. 1997. *Fatigue behaviour of iron based sintered material: a review*. International Materials Reviews, 42 (1997) 1-44.
- HERTZBERG, R. 1996. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. John Wiley & Sons. New York, USA.
- HOGÄNAS. 1999. *Hogånas Handbook for sintered components: Vol. 6. Metallography*.
- HOGÄNAS. 2002. *Hogånas Handbook: Iron and steel powders for sintered components*.
- HOLMES, J. y QUEENEY, R. 1985. *Fatigue crack initiation on a porous steel*. Powder Metallurgy, 28 (1985) 231-235.
- HUPPMANN, W., DALAL, K., WELLNER, P. y ELSSNER, G. 1983. *Metallographic characterization of PM materials*. Powder Metallurgy, 26 (1983) 23-30.
- HYUN, S., MURAKAMI, K. y NAKAJIMA, H. 2001. *Anisotropic mechanical properties of porous copper fabricated by unidirectional solidification*. Materials Science and Engineering A299 (2001) 241-248.
- INGELSTROM, N. y USTIMENKO, V. 1975. *The influence of porosity and carbon content on the fracture toughness of some sintered steels*. Powder Metallurgy, 18 (1975) 303-322.

JACQUES, P., FURNÉMONT, Q., PARDOEN, T. y DELANNAY, F. 2001. *On the role of martensitic transformation on damage and cracking resistance in TRIP-assisted multiphase steels*. Acta Materialia, 49 (2001) 139-152.

JI, S., GU, Q. y XIA, B. 2006. *Porosity dependence of mechanical properties of solid materials*. Journal of Materials Science, 41 (2006) 1757-1768.

KUBICKI, B. 1995. *Stress concentration at pores in sintered materials*. Powder Metallurgy, 38 (1995) 295-298.

KUMAR, A. 2003. *Physical metallurgy handbook*. Ed. McGraw-Hill. New York, USA.

KHORSAND, H., HABIBI, S., YOOZBASHIZADEA, H., JANGHORBAN, K., REIHANI, S., RAHMANI, H. y ASHTARI, M. 2002. *The role of heat treatment on wear behavior of powder metallurgy low alloy steels*. Materials and Design, 23 (2002) 667-670.

LADOS, D. y APELIAN, D. 2005. *Porosity and microstructure in P/M alloys: critical review of their effects on fatigue and fatigue crack growth*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 3 (2005) 10/90-10/110.

LEMIEUX, P., THOMAS, Y., MONGEON, P., PELLETIER, S. y ST-LAURENT, S. 2002. *Combining electrostatic die wall lubrication and warm compaction to enhance green and sintered properties of P/M components*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 3 (2002) 34-46.

LI, Y., NGAI, T., XIAO, Z., ZHANG, D. y CHEN, W. 2002a. *Study on mechanical properties of warm compacted iron-base materials*. Journal of Central South University of Technology, 9 (2002) 154-158.

LI, Y., NGAI, T., ZHANG, D., LONG, Y. y XIA, W. 2002b. *Effect of die wall lubrication on warm compaction powder metallurgy*. Journal of Materials Processing Technology, 129 (2002) 354-358.

LIN, S., LEE, Y y LU, M. 2001. *Evaluation of staircase and the accelerated test methods for fatigue limit distributions*. International Journal of Fatigue, 23 (2001) 75-83.

LINDNER, K. y SONSINO, C. 1994. *How sintering time and temperature influence fatigue*. Metal Powder Report, 49 (1994) 30-36.

MARCU, T., SIGNORINI, M., MOLINARI, A. y STRAFELLINI, G. 2003. *Image analysis investigation of the effect of the process variables on the porosity of sintered chromium steels*. Materials Characterization, 50 (2003) 1-10.

MANSOORZADEH, S. y ASHRAFIZADEH, F. 2005. *The effect of thermochemical treatments on case properties and impact behaviour of Astaloy CrM*. Surface & Coatings Technology, 192 (2005) 231-238.

- McCLUNG, R., CHAN, K., HUDAK, S. y DAVIDSON, D. 1996. *Behavior of small fatigue cracks*. En: ASM Handbook, Vol. 19 (1996) 153-158. ASM International. Materials Park, USA.
- MEGUID, S. 1996. *Mechanics and mechanisms of toughening of advance ceramics*. Journal of Materials Processing Technology, 56 (1996) 978-989.
- METAL POWDER REPORT. 2004. *Fatigued? Swedish experts point the way to high performance PM*. Metal Powder Report, 59 (2004) 26-27.
- METAL POWDER REPORT. 2006. *Fatigue to the fore as Skaupy Prize goes to Sonsino*. Metal Powder Report, 61 (2006) 7-9.
- MILLIGAN, D., ENGSTROM, U. y SMITH, S. 2005. *High temperature sintering—a cost effective way to future high performance materials*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (2005) 5/46-5/50.
- MORRIS, W. 1980. *The noncontinuum crack tip deformation behavior of surface microcracks*. Metallurgical Transactions, 11A (1980) 1117-1123.
- MPIF Std. 42. 2003. *Determination of density of compacted or sintered powder metallurgy products*. Metal Powder Industries Federation. Princeton, USA.
- NAVARA, E. y BENGTTSSON, B. 1984. *Fracture toughness of P/M steel*. International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology, 20 (1984) 33-43.
- NEWMAN, J. y RAJU, I. 1981. *An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack*. Engineering Fracture Mechanics, 15 (1981) 185-192.
- OLEVSKY, E., SHOALES, G. y GERMAN, R. 2001. *Temperature effect on strength evolution under sintering*. Materials Research Bulletin, 36 (2001) 449-459.
- OLIVER, W. y PHARR, G. 1992. *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. Journal of Materials Research, 7 (1992) 1564-1583.
- OLIVER, W. y PHARR, G. 2004. *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology*. Journal of Materials Research, 19 (2004) 3-20.
- PEACOCK, S. y MOON, J. 2000. *Strengths and toughnesses of some PM steels consolidated by rotatory forging and sintering*. Powder Metallurgy, 43 (2000) 49-55.
- PHILLIPS, R., KING, J. y MOON, J. 2000. *Fracture toughness of some high density PM steels*. Powder Metallurgy, 43 (2000) 43-48.
- PILKEY, W. 1997. *Peterson's stress concentration factors*. John Wiley & Sons. New York, USA.

PIOTROWSKI, G. y BIALLAS, G. 1998. *Influence of sintering temperature on pore morphology, microstructure and fatigue behaviour of MoNiCu alloyed sintered steel*. Powder Metallurgy, 41 (1998) 109-114.

PIOTROWSKI, G., DENG, X., CHAWLA, N., NARASIMHAN, K., y MARUCCI, M. 2004. *Fatigue crack growth of Fe-0.85Mo-2Ni-0.6C steels with a heterogeneous microstructure*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 3 (2004) 10/86-10/97.

POLASIK, S., WILLIAMS, J. CHAWLA, N. y NARASIMHAN, K. 2001. *Fatigue crack initiation and propagation in ferrous powder metallurgy alloys*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 10 (2001) 172-187.

QUINN, J. y QUINN, G. 1998. *Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach*. Journal of Material Science, 32 (1998) 4331-4346.

RAJU, I., ATLURI, S. y NEWMAN, J. 1989. *Stress intensity factor for small surface and corner cracks in plates*. Fracture Mechanics: Perspectives and Directions - Twentieth Symposium, (1989) 297-316. R.P. Wei and R.P. Gangloff (eds.) ASTM, Philadelphia, USA.

RAWLINGS, A., LUK, S. y HANEJKO, F. 2001. *Engineered approach to high density forming using internal and external lubricants*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (2001) 9p.

REED-HILL, R. 1973. *Physical metallurgy principles*. PWS-KENT Publishing. Boston, USA.

RICE, R. 1993. *Comparison of stress concentration versus minimum solid area based mechanical property-porosity relations*. Journal of Material Science, 28 (1993) 2187-2190.

RITCHIE, R. 1999. *Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids*. International Journal of Fracture, 100 (1999) 55-83.

RUAS, C. y ST-LAURENT, S. 2003. *Effect of molybdenum content on mechanical properties of sintered PM steels*. Proceedings of PTECH Conference, Guarujá, Brazil (2003).

RUTZ, H. y HANEJKO, F. 1994. *High density processing of high performance ferrous materials*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 5 (1994) 117-133.

SANDEROW, H., SPIRKO, J. y FRIEDHOFF, T. 1997. *Fatigue properties of P/M materials. Relationship of RBF and AF results to materials processing parameters*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 13 (1997) 117-135.

SCHAEFER, D. y TROMBINO, C. 2005. *State of the north american P/M industry*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (2005) 1-12.

- SCHATT, W. y WIETERS, K. 1997. *Powder Metallurgy: Processing and Materials*. EPMA. Shrewsbury, England.
- SHAN, Z. y LENG, Y. 1999. *Fracture and fatigue behavior of sintered steel at elevated temperatures: Part. 1. Fracture toughness*. Metallurgical and Materials Transactions A, 30A (1999) 2885-2893.
- SIGL, S., DELARBRE, P., LIPP, K. y SONSINO, C. 2005. *Static and fatigue properties of high strength PM-steels*. Conference proceedings of EuroPM2005, 1 (2005) 151-156.
- SIMCHI, A. 2003. *Effects of lubrication procedure on the consolidation, sintering and microstructural features of powder compacts*. Materials and Design, 24 (2003) 585-594.
- SONSINO, C. 1990. *Fatigue design for powder metallurgy*. Powder Metallurgy, 33 (1990) 235-245.
- SONSINO, C., SCHLIEPER, G. y HUPPMANN, W. 1985. *How to improve the fatigue properties of sintered steels by combined mechanical and thermal surface treatments*. Modern Developments in Powder Metallurgy , 16 (1985) 33-48.
- ST-LAURENT, S. y CHAGNON, F. 2001. *Influence of powder mix formulation on green and sintered properties of warm pressed specimens*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 3 (2001) 3/64-3/76.
- STOROZHEVSKII, I. 1968. *Some problems of modelling a porous body*. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 7 (1968) 409-413.
- STRAFFELLINI, G., FONTANARI, V. y MOLINARI, A. 1999. *True and apparent Young's modulus in ferrous porous alloys*. Materials Science and Engineering A260 (1999) 197-202.
- STRAFFELLINI, G. 2005. *Strain hardening behaviour of powder metallurgy alloys*. Powder Metallurgy, 48 (2005) 189-192.
- SUDHAKAR, K. 2000. *Fatigue behavior of a high density powder metallurgy steel*. International Journal of Fatigue, 22 (2000) 729-734.
- SURESH, S. 1983. *Crack deflection: implications for the growth of long and short fatigue cracks*. Metallurgical Transactions, 14A (1983) 2375-2385.
- SURESH, S. 1985. *Fatigue crack deflection and fracture surface contact: micromechanical models*. Metallurgical Transactions, 16A (1985) 249-260.
- SURESH, S. 1998. *Fatigue of materials*. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- SURESH, S. y RITCHIE, R. 1984. *Propagation of short fatigue cracks*. International Metals Reviews, 29 (1984) 445-476.

TAYLOR, D., HUGHES, M. y ALLEN, D. 1996. *Notch fatigue behaviour in cast irons explained using a fracture mechanics approach*. International Journal of Fatigue, 18 (1996) 439-445.

TENGZELIUS, J. 2005. *Advances in steel powders for high performance PM parts*. Conference proceedings of PMAAsia2005 (2005) 1-10.

TURENNE, S., GODÈRE, C. y THOMAS, Y. 2000. *Effect of temperature on the behaviour of lubricants during powder compaction*. Powder Metallurgy, 43 (2000) 139-142.

VERDU, C., CARABAJAR, S., LORMAND, G. y FOUGÈRES, R. 2001. *Fatigue crack growth characterization and simulation of a porous steel*. Materials Science and Engineering A319-321 (2001) 544-549.

WANG, J. y DANNINGER, H. 1998. *Dry sliding wear behavior of molybdenum alloyed sintered steels*. Wear, 222 (1998) 49-56.

WEI, Y., WANG, X. y ZHAO, M. 2004. *Size effect measurement and characterization in nanoindentation test*. Journal of Materials Research, 19 (2004) 208-217.

WEISS, B., STICKLER, R. y SYCHRA, H. 1990. *The influence of porosity on static and dynamic properties of P/M iron*. Metal Powder Report, 45 (1990) 187-192.

WHITE, D. 2002. *State-of-the-North American P/M industry-2002*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (2002) 1-12.

YOUNG, W y BUDYNAS, R. 2001. *Roark's formulas for stress and strain*. Ed. McGraw-Hill. New York, USA.

YOUSEFFI, M., WRIGHT, C. y JEYACHEYA, F. 2000. *Effect of carbon content, sintering temperature, density and cooling rate upon properties of prealloyed Fe-1.5Mo powder*. Powder Metallurgy, 43 (2000) 270-274.

YU, Y. 2005. *Powder production and characterisation*. Course Figures of PM Summer School EPMA (2005) 83-105.

ZHAOHUI, S. y LENG, Y. 1999. *Fracture and fatigue behavior of sintered steel at elevated temperatures: Part II. Fatigue crack propagation*. Metallurgical and Materials Transactions A, 30A (1999) 2895-2904.

Anexo

Publicaciones y Congresos

Bris, J., Llanes, L., Anglada, M., Calero, J. y Benitez, F. **2004**. *Warm compaction effects on the mechanical behaviour of sintered steels*. Proceedings of World Congress & Exhibition on Powder Metallurgy - PM2004, Vienna-Austria, Vol.3 (2004) 61-66.

Bris, J., Benitez, F., Llanes, L., Mateo, A., Calero, J.A. y Llanes, L. **2005**. *Fracture toughness-strength relationship for high density PM steels*. European Congress & Exhibition on Powder Metallurgy–Euro PM2005, Prague-Czech Republic (2005) 363-369.

Bris, J., Benitez, F., Mateo, A., Calero, J., Anglada, M. y Llanes, L. **2006**. *Fracture toughness of high-density sintered steels**. Anales de Mecánica de la Fractura. Albarracín-Teruel, Vol. 2 (2006). 397-401.

Bris, J., Calero, J., Mateo, A., y Llanes, L. **2006**. *Fatigue strength of high-density sintered steels*. Proceedings of 9th International Fatigue Congress, Atlanta-USA, Oral reference FT190 (2006) 1-8.

Bris, J., Llanes, L. y Calero, J. **2006**. *Evaluación de la tenacidad de fractura en aceros sinterizados de alta densidad*. Revista Ingeniería & Desarrollo, 19 (2006) 31-43.

Bris, J., Benitez, F., Mateo, A., Calero, J., Llanes, L. y Anglada, M. **2006**. *Comportamiento a fatiga y fractura de aceros sinterizados de alta densidad*. Primer Congreso Español de Pulvimetalurgia, Leganés-Madrid (2006).

(*) Trabajo seleccionado por el Grupo Español de Fractura para ser publicado en: *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*.