

Simulación del procesamiento de una aleación de Ti-6Al-7Nb por la técnica de presión en canal angular constante usando el método de elementos finitos

Simulation for processing of a Ti-6Al-7Nb alloy by equal-channel angular pressing (ECAP) using the finite element method

Mónica Conejo-Herrera¹, Jorge M. Cubero-Sesin², Zenji Horita³⁻⁴,
Hyoungh Seop Kim⁵

Fecha de recepción: 13 de setiembre de 2016
Fecha de aprobación: 7 de diciembre de 2016

Conejo-Herrera, M; Cubero-Sesin, J; Horita, Z; Kim, H. Simulación del procesamiento de una aleación de Ti-6Al-7Nb por la técnica de presión en canal angular constante usando el método de elementos finitos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 30-2. Abril-Junio 2017. Pág 25-35.

DOI: 10.18845/tm.v30i2.3193



- 1 Ingeniera en Materiales. Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mmconejoj@gmail.com
- 2 Profesor Investigador. Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico jcubero@itcr.ac.cr
- 3 Profesor, Department of Materials Science and Engineering, Kyushu-University, Fukuoka, Japan
- 4 Principal Investigator, WPI, International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (WPI-I2CNER), Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- 5 Profesor, Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

Palabras clave

Equal-channel angular pressing; Ti-6Al-7Nb; método de elementos finitos.

Resumen

En este trabajo se utilizó el método de elementos finitos para el análisis de la deformación plástica de una barra de Ti-6Al-7Nb de sección cuadrada con dimensiones de 10 x 10 mm², procesada mediante la técnica de presión en canal angular constante (ECAP, por sus siglas en inglés). Primeramente, se simuló el procesamiento con diferentes ángulos internos y radios de curvatura externo e interno del canal, por medio de un modelo simplificado en 2D. Se determinó la influencia de estos parámetros en la magnitud y la homogeneidad de la deformación, así como de la carga aplicada. A partir de los resultados de la simulación en 2D, se seleccionaron los radios de curvatura óptimos para cada ángulo interno, a partir de un diseño propuesto para las dimensiones externas y el material del dado de procesamiento de ECAP. Seguidamente, mediante la simulación en 3D se determinó que tanto las dimensiones y el material del dado seleccionados, son adecuados para resistir las altas presiones del proceso.

Keywords

Equal-channel angular pressing; finite element method; Ti-6Al-7Nb.

Abstract

In this work, the finite element method was used to analyze plastic deformation of a bar of Ti-6Al-7Nb with a squared cross section of 10 x 10 mm² processed by equal-channel angular pressing (ECAP). Firstly, this process was simulated for different internal angles and internal and external radii of curvature of the channel, by a simplified 2D model. The influence of these parameters on the magnitude and homogeneity of the deformation, as well as on the applied load, was determined. From the 2D simulation results, optimum curvature radii for each internal angle was selected, based on a proposed design for the external dimensions and material of the ECAP processing die. Furthermore, it was determined by 3D simulation that the selected dimensions and material for the die are sufficient to withstand the high pressures involved in this process.

Introducción

El gran avance tecnológico de los últimos años ha hecho que la búsqueda de materia prima con propiedades superiores se haya convertido en una de las tareas principales de los ingenieros en materiales. Productos con altos estándares de calidad y requerimientos cada vez más exigentes son los que demanda actualmente el mercado, para lo cual se requiere de materiales con características específicas que permitan alcanzar estos estándares y requerimientos.

Consecuentemente, desde hace varios años, uno de los enfoques que se ha tomado en la academia es en el desarrollo de materiales volumétricos de grano ultra-fino, o UFG, por sus siglas en inglés. Los materiales volumétricos UFG se definen como materiales policristalinos con tamaños de grano promedio menores a 1 µm. Esta categoría incluye a todos aquellos materiales submicrométricos (100-1000 nm) o nanométricos (< 100 nm) [1]. Los métodos más populares para la obtención de materiales UFG son los procesos de deformación plástica severa, o SPD, por sus siglas en inglés, entre los cuales se encuentra la técnica de presión en canal angular constante, ó *equal-channel angular pressing* (ECAP).

El proceso de ECAP, fue desarrollado en los años 80 por Segal y sus colaboradores [2]. Consiste en hacer pasar a presión una barra de área transversal cuadrada o cilíndrica a través de un dado, especialmente diseñado para introducir deformación plástica intensa [3]. Un pistón accionado por una prensa hidráulica se utiliza generalmente para este propósito. En esta técnica, el dado está diseñado de forma tal que el canal por donde pasa la barra tenga un área transversal constante y un ángulo abrupto, generalmente 90°, tal y como se muestra en la figura 1. Cuando el material pasa por el punto de intersección, se generan deformaciones cortantes simples, capaces de reducir de forma significativa el tamaño de grano.

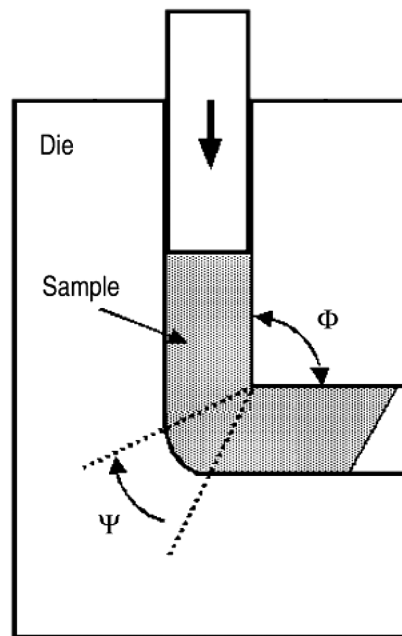


Figura 1. Dado empleado en el proceso de ECAP, donde el ángulo Φ es el ángulo interno y ψ el externo. Tomado de [2]

Debido a que el área transversal de la barra no cambia, es posible realizar el mismo proceso repetidas veces, y de esta forma acumular deformación en cada pasada. La ecuación 1 rige la deformación equivalente de Von Mises ϵ , obtenida según el número de repeticiones N , la cual depende del ángulo interno Φ y externo ψ del dado, tal y como se muestran en la figura 1 [4].

$$\epsilon = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

Las propiedades finales de la pieza luego del proceso de ECAP, dependen en gran medida de los parámetros geométricos de la cavidad del molde. Por ejemplo, el ángulo interno de la cavidad, expresado en la literatura como ángulo Φ , es uno de los más importantes pues determina el grado de deformación que tendrá el material. En pruebas realizadas utilizando la ruta B_C (rotaciones de 90° a lo largo de la dirección longitudinal de la barra en cada repetición) y ángulos de $\Phi = 90^\circ$, $\Phi = 112,5^\circ$, $\Phi = 135^\circ$ y $\Phi = 157,5^\circ$, se determinó que a medida que aumenta el ángulo Φ , disminuye la deformación introducida en el material para un mismo número de repeticiones [4]. Para el caso del aluminio el valor óptimo es $\Phi = 90^\circ$, no obstante, para materiales con mayor dificultad para ser deformados como el titanio y sus aleaciones, este parámetro puede mantenerse en 90° [5-10] o aumentarse a 105° [11] o 120° [12,13],

dependiendo de las capacidades de cada equipo de procesamiento tales como la carga y la temperatura de deformación.

El ángulo de curvatura externo ψ es igualmente un factor importante para la homogeneidad y distribución del flujo de material. Se ha determinado que al tener un valor de $\psi = 0^\circ$, se pueden presetar problemas de llenado en la intersección de los canales. En otras palabras, se genera una zona muerta o “dead-metal zone”, la cual es un problema común en técnicas convencionales de deformación como la extrusión. Existen una serie de investigaciones acerca del efecto de este ángulo en la zona muerta. Deng et al encontró que a un ángulo $\psi \geq 30^\circ$, esta zona desaparece, sin embargo, a $\psi = 20^\circ$ se obtienen las menores heterogeneidades de deformación [14]. Por otro lado, A.V Nagasekhar y Tick-Hon [15] reportaron que un $\psi=10^\circ$ representa el mejor valor para producir una deformación homogénea durante el procesamiento ECAP a $\Phi = 90^\circ$, mientras que Xu et al obtuvieron un valor óptimo de $\psi \leq 28^\circ$ [16].

Además del ángulo de curvatura externo, el ángulo de curvatura interno, denotado como R_i , tiene importancia a nivel práctico y será tomado en cuenta en la simulación. Aunque no se toma en cuenta en el modelo de la ecuación (1), puede tomar valores similares a ψ .

De esta forma, dado que los resultados de deformación, carga aplicada y heterogeneidad dependen del material a procesar, es importante realizar un estudio específico de cada material que se pretenda procesar por medio de ECAP. En años recientes, numerosas investigaciones se han realizado sobre las aleaciones biomédicas de titanio procesadas por ECAP, dado el potencial que presenta este proceso en la industria médica para la fabricación de implantes. Sin embargo, entre estas aleaciones de grado biomédico, la aleación Ti-6Al-7Nb es relativamente nueva, ya que se ha diseñado para reemplazar a la aleación Ti-6Al-4V por asuntos de histotoxicidad, y su comportamiento bajo deformación plástica severa no ha sido estudiado a profundidad. Es por ello, que en este trabajo se simuló el procesamiento de una aleación de Ti-6Al-7Nb por ECAP usando el método de elementos finitos. Se estudió la influencia de ángulos internos del canal de $\Phi = 90^\circ$, $\Phi = 105^\circ$ y $\Phi = 120^\circ$, así como diferentes radios de curvatura externos e internos, en la deformación y carga aplicada sobre la pieza, con el fin de encontrar los parámetros óptimos. Este resultado se utilizó para validar el diseño de las dimensiones externas y el material de un dado de acero grado herramienta que sea capaz de resistir los esfuerzos generados al procesar una aleación de Ti-6Al-7Nb por ECAP.

Materiales y metodología

Simulaciones isotérmicas del proceso de ECAP se llevaron a cabo con ayuda del software comercial ABAQUS/Standard. Primeramente, se realizó la simulación en 2D asumiendo una condición de deformación plana con el fin de disminuir el tiempo computacional.

El análisis se llevó a cabo en una barra con dimensiones de 10x10x80 mm de Ti-6Al-7Nb. La información de las propiedades de este material se tomó de un ensayo de tensión a temperatura ambiente a una razón de deformación de $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ realizado en la Universidad de Kyushu. Asimismo, se realizó una preforma en la parte inferior de la pieza, puesto que se ha demostrado mediante FEM (finite element method) que permite disminuir las fuerzas aplicadas y mejorar la homogeneidad de la deformación [17].

En las simulaciones en 2D, el dado y el pistón se simularon como elementos rígidos, ya que su rigidez y resistencia son mayores a los de la aleación Ti-6Al-7Nb. Se empleó una velocidad constante de 3mm/s pues a menores velocidades se cumple la aproximación isotérmica. Otra condición de borde empleada fue de empotramiento en la zona inferior del dado. Además, se simularon ángulos internos de $\Phi = 90^\circ$, 105° y 120° , así como radios de curvatura interna de $R_i = 3^\circ, 9^\circ, 18^\circ, 27^\circ$ y 36° y externos de $\psi = 3^\circ, 9^\circ, 18^\circ, 27^\circ$ y $36^\circ, 45^\circ$ y 90° . Se llevaron a cabo un total

de 33 simulaciones en 2D, empleando 3725 elementos CPE4R y con un tiempo de simulación menor a 1 hora para cada uno de ellos.

Una vez obtenidos los resultados se calculó el coeficiente de varianza de la deformación, con el fin de analizar la heterogeneidad de la misma. Las ecuaciones empleadas para su cálculo son:

$$\varepsilon_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$CV_{\varepsilon} = \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon_{prom}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde n es número de nodos en la muestra, la deformación en cada nodo, es la deformación promedio y la desviación estándar de la deformación.

Por otro lado, se realizó una simulación en 3D con el fin de comprobar la resistencia del dado. Consecuentemente, se modelaron el dado y pistón como materiales deformables y de AISI H13, material de uso frecuente en la fabricación de moldes. La geometría considerada fue de un dado con ángulos característicos de $\Phi = 90^\circ$, $\psi = 3^\circ$ y $R_i = 3^\circ$. Se asignó una condición de empotramiento, por lo que se restringió el movimiento en todas las direcciones y se utilizaron elementos C3D10. Además, se asignó una condición de simetría en el plano Z, por lo que solamente se modeló la mitad del molde

Resultados y Discusión

Obtener un resultado satisfactorio del proceso de ECAP depende en gran mayoría del diseño del dado. Es por esta razón, que se deben considerar aspectos geométricos y de resistencia mecánica en el diseño, con el fin de asegurar, no solo una deformación adecuada de la barra, sino también una larga duración del dado.

La distribución de la deformación para los ángulos internos de $\Phi = 90^\circ$, $\Phi = 105^\circ$ y $\Phi = 120^\circ$ se muestra en las figuras 2, 3 y 4, respectivamente, para radios de curvatura interno y externo de 3° . De estas figuras es posible observar que la deformación decrece al incrementar el ángulo Φ . Además, se observa una distribución menos homogénea en el ángulo de $\Phi = 120^\circ$.

Los resultados de las simulaciones para otros radios de curvatura demostraron que la influencia del radio de curvatura externo resultó ser la misma para cada ángulo interno considerado, por lo cual al aumentar el valor de ψ , la deformación equivalente disminuyó, la carga disminuyó y el espacio entre la muestra y el dado se redujo. La formación de este último dependerá de la razón de endurecimiento por deformación del material de la muestra y el ángulo externo del dado. De esta forma, se espera que un material perfectamente plástico, llene completamente la cavidad. Para un material endurecible por deformación, la zona posterior sufre mayor deformación, por lo que se endurece más. Por el contrario, la zona inferior con menos deformación es más suave y puede fluir más rápido hacia el canal de salida. De este modo, la parte inferior de la muestra recorre una distancia menor por lo que posee una deformación menor que la parte superior de la zona central de la muestra [18].

De igual forma, la carga necesaria para hacer pasar la pieza a través de la cavidad del dado fue estudiada. Para ello, en la figura 6 se presentan las curvas de fuerza-desplazamiento para las condiciones de $\Phi = 90^\circ$, $R_i = 3^\circ$ y diversos ángulos ψ . De estas curvas, es posible observar que todas presentan un comportamiento similar.



Figura 2. Deformación equivalente para $\Phi=90^\circ$, $\psi = 3^\circ$ y $R_i=3$

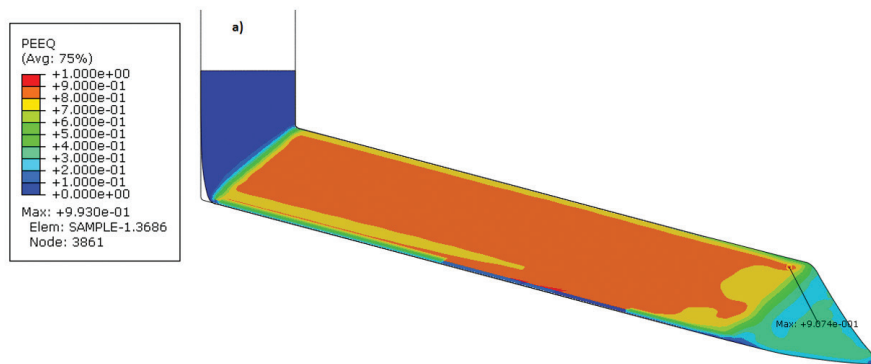


Figura 3. Deformación equivalente para $\Phi=105^\circ$, $\psi = 3^\circ$ y $R_i=3$

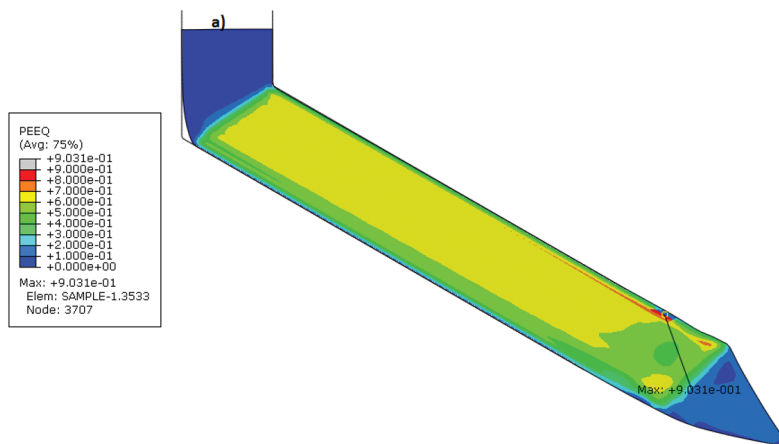


Figura 4. Deformación equivalente para $\Phi=105^\circ$, $\psi = 3^\circ$ y $R_i=3$

En el caso de la variación del radio de curvatura interno, la influencia no es la misma para cada Φ , sino que cambió respecto a cada uno. Así, para $\Phi = 90^\circ$ la deformación y carga aplicada aumentó conforme R_i fuera mayor. Para $\Phi = 105^\circ$ no se tiene una relación lineal pues se tienen altos y bajos como se ejemplifica en el gráfico de la figura 5. Asimismo, para $\Phi = 120^\circ$ el resultado es opuesto al de $\Phi = 90^\circ$, pues la deformación disminuyó con R_i mayores.

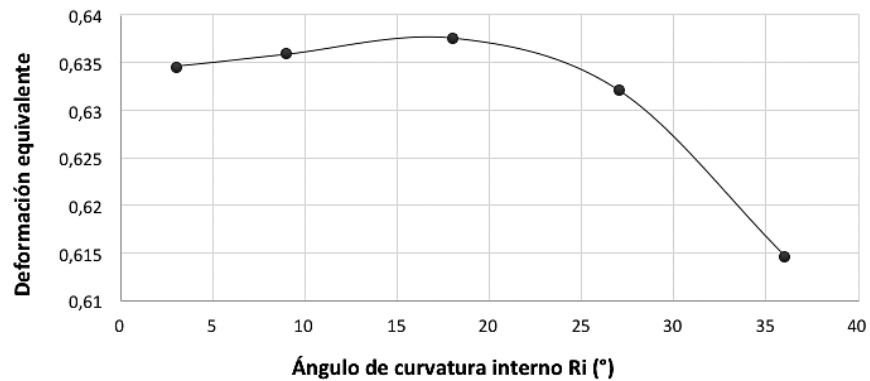


Figura 5. Gráfico de deformación equivalente promedio vs ángulo de curvatura interna R_i para $\Phi=105^\circ$ y $\psi=3^\circ$.

A continuación, se destacan tres comportamientos o etapas que se cumplen para todas las condiciones analizadas. Primeramente, las curvas iniciaron en 0 N, pues las piezas se colocaron más arriba de la zona de intersección de los canales, lo cual hace que, al haber considerado condiciones de cero fricción, la pieza pueda bajar simplemente por gravedad. Una vez que la pieza se encuentra en la zona de deformación plástica, se debe aplicar una fuerza cada vez mayor para hacerla pasar hasta el canal de salida. El pico que se da cercano de los 15 mm de desplazamiento, es cuando la pieza empieza a ingresar al canal de salida. Estos picos son mayores a mayores ángulos de curvatura externa. Pero en general, se observa que a mayor radio de curvatura externo, menor es la fuerza requerida para hacer pasar la pieza por el canal. Estas diferencias se deben a la interacción con la variable del radio de curvatura interno, R_i , por lo que se discuten a continuación los resultados de las simulaciones para el cambio de esta variable. Para el caso del aumento de R_i la fuerza continúa aumentando debido al endurecimiento por deformación, esto ocurre para $\psi = 3^\circ$ y 9° . Por otro lado, a ψ mayores, la fuerza disminuye pues parte de esta se libera cuando la cabeza de la muestra pasa la zona de deformación. Finalmente, cerca de los 60 mm la preforma de la pieza ha salido completamente del dado, lo que libera nuevamente parte de esta.

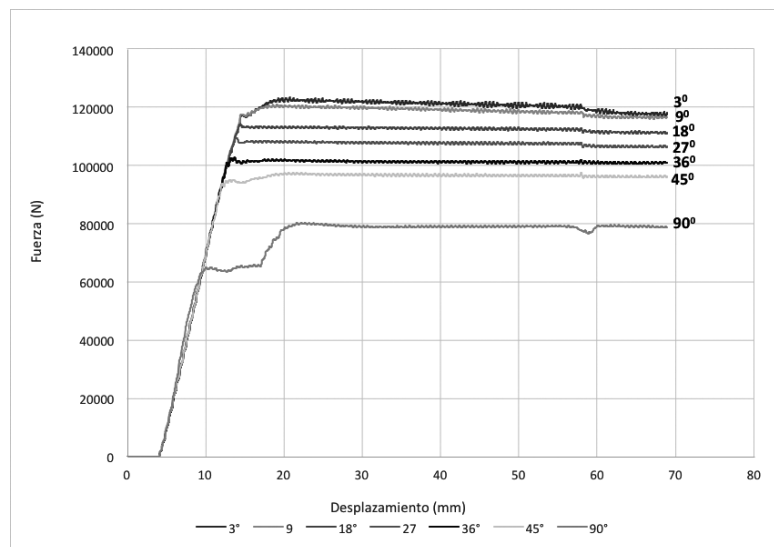


Figura 6. Curva de fuerza vs desplazamiento para $\Phi = 90$ y $R_i = 3^\circ$, con diversos radios de curvatura externo.

Finalmente, los coeficientes de varianza se muestran en las gráficas de las figuras 7 y 8 para variaciones de R_i y de ψ , respectivamente. Se determina que la heterogeneidad de la deformación aumenta con el ángulo interno, por lo que con $\Phi = 90^\circ$ se obtiene la mayor homogeneidad. Además, la heterogeneidad tiene una pequeña variación para $R_i = 3^\circ, 9^\circ$ y 18° para los tres ángulos internos, mientras que para valores mayores de R_i la diferencia es mayor.

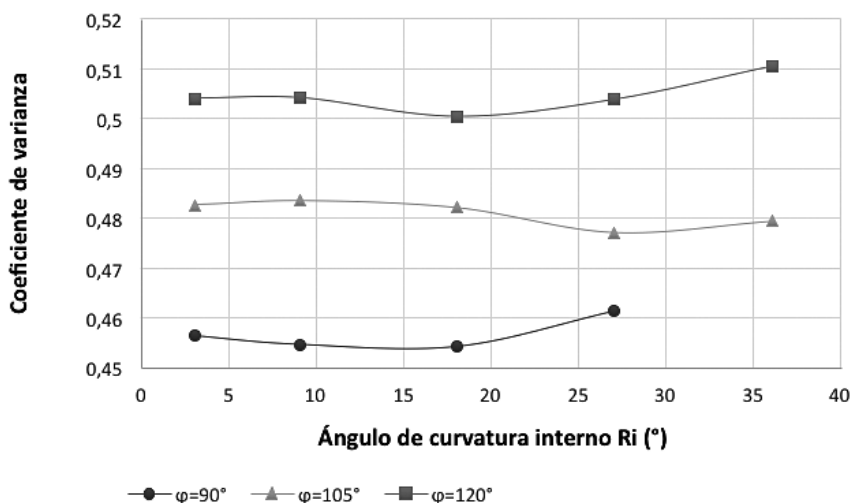


Figura 7. Gráfico de coeficiente de varianza para $\psi = 3^\circ$ vs valores de R_i .

El menor coeficiente de varianza se obtiene a $R_i = 18^\circ$ para $\Phi = 90^\circ$, $R_i = 27^\circ$ para $\Phi = 105^\circ$ y $R_i = 18^\circ$ para $\Phi = 120^\circ$. Por otro lado, la varianza sigue una tendencia más complicada para el radio de curvatura externo, y donde la menor heterogeneidad se obtiene con $\psi = 3^\circ$ para los tres casos. De esta forma, la combinación ideal de deformación, homogeneidad, fuerza y formación del “corner gap” se muestra en el cuadro 1 para cada uno de los ángulos internos del dado

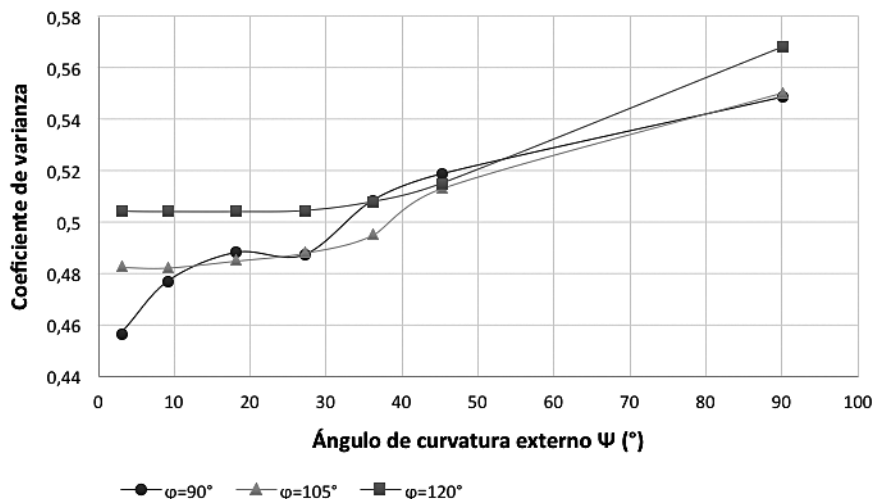


Figura 8. Gráfico de coeficiente de varianza para $R_i = 3^\circ$ vs valores de ψ .

Cuadro 1. Selección de radios de curvatura óptimos para cada ángulo interno del dado.

Ángulo interno (Φ)	Radio de curvatura interno (R_i)	Radio de curvatura externa (ψ)
90°	3°	27°
105°	27°	27°
120°	18°	27°

Una vez finalizadas las simulaciones en 2D realizadas para cada una de las condiciones consideradas, se procedió a simular el proceso de ECAP con el dado y la muestra en 3D, ambos deformables. El objetivo principal de esta simulación es la obtención de los esfuerzos en el dado. De esta forma, se puede tener una mejor aproximación del proceso real pues se elimina la simplificación de la consideración de deformación plana. La simulación se realizó únicamente con la configuración de R_i y ψ de 3° y $\Phi = 90$. Dado que con esta configuración se debe aplicar una fuerza mayor en el pistón, se prueba el molde bajo el peor escenario de entre todas las configuraciones analizadas en 2D.

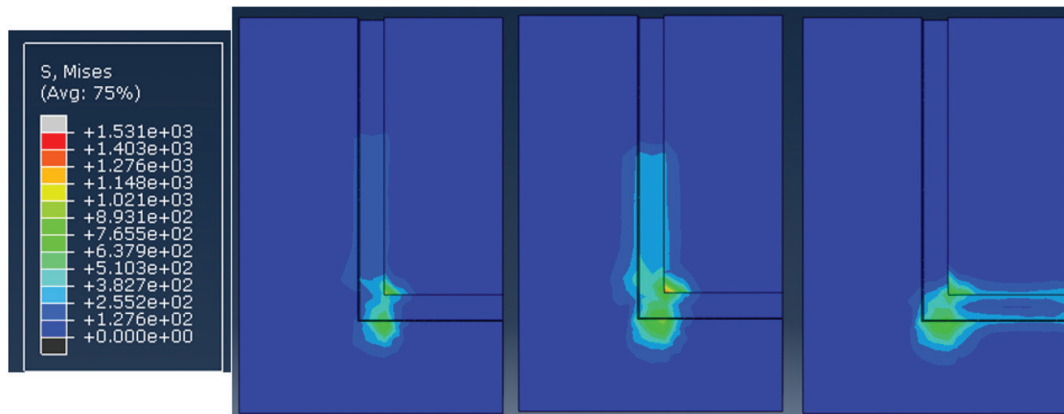


Figura 9. Esfuerzos presentados en el dado conforme fluye la pieza a través de la cavidad. ABAQUS V6.14.

En la figura 9, se muestran los esfuerzos presentes en el dado conforme pasa la pieza a través de la cavidad del molde. Es importante recalcar que los valores mostrados en la escala son en MPa, por lo que el mayor esfuerzo se encuentra en el ángulo interior del dado y es de aproximadamente 1400 MPa. Esto es de esperarse pues aparte de que es una zona de concentración de esfuerzos, en ese mismo lugar se encuentra la zona de deformación plástica. Es decir, la muestra está siendo obligada a fluir a través de la intersección que tiene un área reducida, para lo cual se debe aplicar una fuerza cada vez mayor hasta llegar al desplazamiento de 15mm aproximadamente, donde se daba el primer máximo de fuerza en la curva de fuerza-desplazamiento de la figura 6.

De la misma forma, se observa que los esfuerzos mayores se encuentran distribuidos en la zona de deformación plástica, donde se produce el esfuerzo cortante en el material. Estos esfuerzos mayores, representados en la zona de color verde, poseen un valor entre 500 y 800 MPa. Así, se determina que bajo las condiciones analizadas, tanto geométricas como de proceso, el dado

será capaz de soportar la deformación de la probeta sin deformarse ni fracturarse, pues está muy por debajo del esfuerzo de fluencia del AISI H13.

Además, con la simulación fue posible determinar las fuerzas ejercidas sobre el dado en cada uno de los ejes de coordenadas. La fuerza máxima en el eje vertical, equivalente a la ejercida sobre el pistón es de aproximadamente 125 kN, valor muy cercano a los 124 kN obtenidos en la simulación en 2D, por lo cual la simplificación de deformación plana empleada es una muy buena aproximación. Por otra parte, se determinaron las fuerzas máximas en el eje X y Z, correspondientes a 6.4 kN y 269 kN, respectivamente. Para el caso del diseño de un dado abierto, estas serán las fuerzas que deben soportar los tornillos empleados.

Conclusiones

Se estudió la influencia del ángulo interno y radios de curvatura externo e interno del dado en la deformación y carga aplicada a una probeta de Ti-6Al-7Nb en el proceso de Equal-Channel Angular Pressing (ECAP). Mediante el método de elementos finitos fue posible determinar que la fuerza aplicada y deformación disminuyen al aumentar el radio de curvatura externo. Por otra parte, la influencia del radio de curvatura interno es diferente para cada ángulo interno. De esta forma, para $\Phi = 90^\circ$ la fuerza y deformación aumentan al incrementar R_i . Caso contrario sucede para $\Phi = 120^\circ$. Finalmente, para $\Phi = 105^\circ$ no existe una relación lineal de R_i con la deformación y la carga.

Además, obtener propiedades homogéneas y menores esfuerzos en la pieza depende en gran parte de la elección de los parámetros geométricos. Debido a ello, se seleccionaron los parámetros que brinden una combinación de la menor deformación, menor carga aplicada, mayor homogeneidad y el menor espacio entre la muestra y el dado. Para todos los casos se determinó que el ángulo de curvatura externo adecuado para los 3 ángulos es $\psi = 27^\circ$. Por otro lado, el R_i óptimo es 3° , 27° y 18° para $\Phi = 90^\circ$, 105° y 120° , respectivamente.

Agradecimientos

MCH y JCS agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento a través del proyecto VIE-CF-1490016. ZH agradece a la Fundación Educativa de Metales Livianos por el Fondo de Investigación Científica (S) (No.26220909) del Ministerio de Educación de Japón. Asimismo, se agradece en especial al Prof. Hyoung Seop Kim, Ph.D., tutor externo del proyecto de graduación del cual es producto esta publicación, por su orientación y consejos para llevar a cabo la simulación.

Referencias

- [1] R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. Langdon, M. Zechetbauer and Y. Zhu, "Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation.," *JOM*, vol. 58, no. 4, pp. 33-39, 2006.
- [2] R. Z. Valiev and T. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," *Progress in Materials Science*, vol. 51, no. 7, pp. 881-981, 2006.
- [3] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto and T.G. Langdon, "The process of grain refinement in equal-channel angular pressing," *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 3317-3331, 1998.
- [4] M. J. Zehetbauer and Y. T. Zhu, *Bulk nanostructured materials*, John Wiley & Sons, 2009.
- [5] A. Macháčková, R. Kocich and V. A. Andreyachshenko, "A study of plastic deformation behaviour of Ti alloy during equal channel angular pressing with partial back pressure.," *Computational Materials Science*, vol. 101, pp. 223-241, 2015.

- [6] Z. Lin, L. Wang, X. Xue, W. Lu, J. Qin and D. Zhang, "Microstructure evolution and mechanical properties of a Ti-35Nb-3Zr-2Ta biomedical alloy processed by equal channel angular pressing (ECAP).," *Materials Science and Engineering*, vol. 33, no. 8, pp. 4551-4561, 2013.
- [7] C. Meredith and A. S. Khan, "The microstructural evolution and thermo-mechanical behavior of UFG Ti processed via equal channel angular pressing.," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 219, pp. 257-270, 2015.
- [8] Y. Xirong, Z. Xicheng and F. Wenjie, "Deformed Microstructures and Mechanical Properties of CP-Ti Processed by Multi-Pass ECAP at Room Temperature," *Rare Metal Materials and Engineering*, vol. 38, no. 6, pp. 955-957, 2009.
- [9] X. Zhao, Y. Xirong, T. Langdon and X. Liu, "Processing of commercial purity titanium by ECAP using a 90 degrees die at room temperature," *Materials Science and Engineering*, vol. 607, pp. 482-489, 2014.
- [10] P. Rodriguez Calvillo and J. M. Cabrero Marrero, "Microstructure and mechanical properties of a commercially pure Ti processed by warm equal channel angular pressing," *Materials Science and Engineering*, vol. 625, pp. 311-320, 2015.
- [11] K. Hajizadeh, B. Eghbali, K. Topolski and K. J. Kurzydowski, "Ultra-fine grained bulk CP-Ti processed by multi-pass ECAP at warm deformation region," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 143, pp. 1032-1038, 2014.
- [12] D. V. Gunderov, A. V. Polyakov, I. P. Semenova, G. I. Raab, A. A. Churokova, E. I. Gimaltdnova, I. Sabirov, J. Segurado Escudero, V. D. Sitdikov, I. V. Alexandrov, I. V. Enikeev and R. Z. Valiev, "Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of commercially pure Ti during ECAP-conform processing and drawing," *Materials Science and Engineering: A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, vol. 562, pp. 128-136, 2013.
- [13] Y. Han, J. Li, G. Huang, Y. Lv, X. Shao, W. Lu and D. Zhang, "Effect of ECAP numbers on microstructure and properties of titanium matrix composite," *Materials & Design*, vol. 75, pp. 113-119, 2015.
- [14] G. Deng, C. Lu, L. Su, A. K. Tieu, J. Li, M. Liu and X. Liu, "Influence of outer corner angle (OCA) on the plastic deformation and texture evolution in equal channel angular pressing," *Computational Materials Science*, vol. 81, pp. 79-88, 2014.
- [15] A. V. Nagasekhar and Y. Tick-Hon, "Optimal tool angles for equal channel angular extrusion of strain hardening materials by finite element analysis," *Computational Materials Science*, vol. 30, pp. 489-495, 2004.
- [16] S. Xu, G. Zhao, X. Ma and G. Ren, "Finite element analysis and optimization of equal channel angular pressing for producing ultra-fine grained materials," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 184, no. 1, pp. 209-216, 2007.
- [17] S. C. Yoon, M. S. Seo and H. S. Kim, "Preform effect on the plastic deformation behavior of workpieces in equal channel angular pressing," *Scripta Materialia*, vol. 55, no. 2, pp. 159-162, 2006.
- [18] S. C. Yoon and S. C. Yoon, "Finite element analysis of the effect of the inner corner angle in equal channel angular pressing," *Materials Science and Engineering*, vol. 490, pp. 438-444, 2008.