

# Efecto generado por la presión calibrada en la estructura metalográfica y propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 316L

## Effect generated by the calibrated pressure in the metallographic structure and mechanical properties of AISI 316L austenitic stainless steel

Erney Samir Jiménez Lora<sup>1</sup>, Breiner Antonio Fontalvo Gélvez<sup>1</sup>, Oscar Fabián Higuera Cobos<sup>2</sup>, Isabel Cristina Niño Camacho<sup>3</sup>, Hugo Alexander González Romero<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico,  
Grupo de Investigación CONFORMAT, Barranquilla, Colombia

<sup>2</sup>Ph.D. Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico,  
Grupo de Investigación CONFORMAT, Barranquilla, Colombia

<sup>3</sup>Ph.D. Instructor Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Grupo de Investigaciones CNCA-SENA, Barranquilla, Colombia

<sup>4</sup>Ingeniero, Instructor Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Grupo de Investigaciones  
CNCA-SENA, Barranquilla, Colombia  
Email: oscarhiguera@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 16/11/2018  
Aceptado: 04/01/2019

Cite this article as: E. S. Jiménez Lora, B. A. Fontalvo Gélvez, O. F. Higuera Cobos, I. C. Niño Camacho, H. A. González Romero "Effect generated by the calibrated pressure in the metallographic structure and mechanical properties of AISI 316L austenitic stainless steel", *Prospectiva*, Vol 17, N° 1, 70-74, 2019.

### RESUMEN

Muestras de acero inoxidable 316L fueron sometidas a deformación plástica severa mediante la técnica de presión calibrada a temperatura ambiente a una deformación máxima equivalente de  $\epsilon \sim 4,64$ . Posteriormente se evaluaron las propiedades mecánicas y se relacionaron con la microestructura mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido. Los resultados muestran que después del primer pase se obtiene un aumento en la dureza, el límite elástico y la resistencia última a la tracción del material, debido a la reducción del tamaño de grano, a la presencia de maclado mecánico y de martensita inducida por deformación.

**Palabras clave:** AISI 316L; Austenítico; Deformación plástica severa; Presión calibrada; Presión calibrada restringida; Esfuerzos; Microdureza

### ABSTRACT

Samples of 316L stainless steel were subjected to severe plastic deformation by the groove pressing technique at room temperature to a maximum equivalent deformation of  $\epsilon \sim 4,64$ . Subsequently, the mechanical properties were evaluated and related to the microstructure by the scanning electron microscopy technique. The results show that after the first step an increase in the hardness, the elastic limit and the ultimate tensile strength in the material is obtained, due to the reduction of the grain size, the presence of mechanical twinning and martensite induced by deformation.

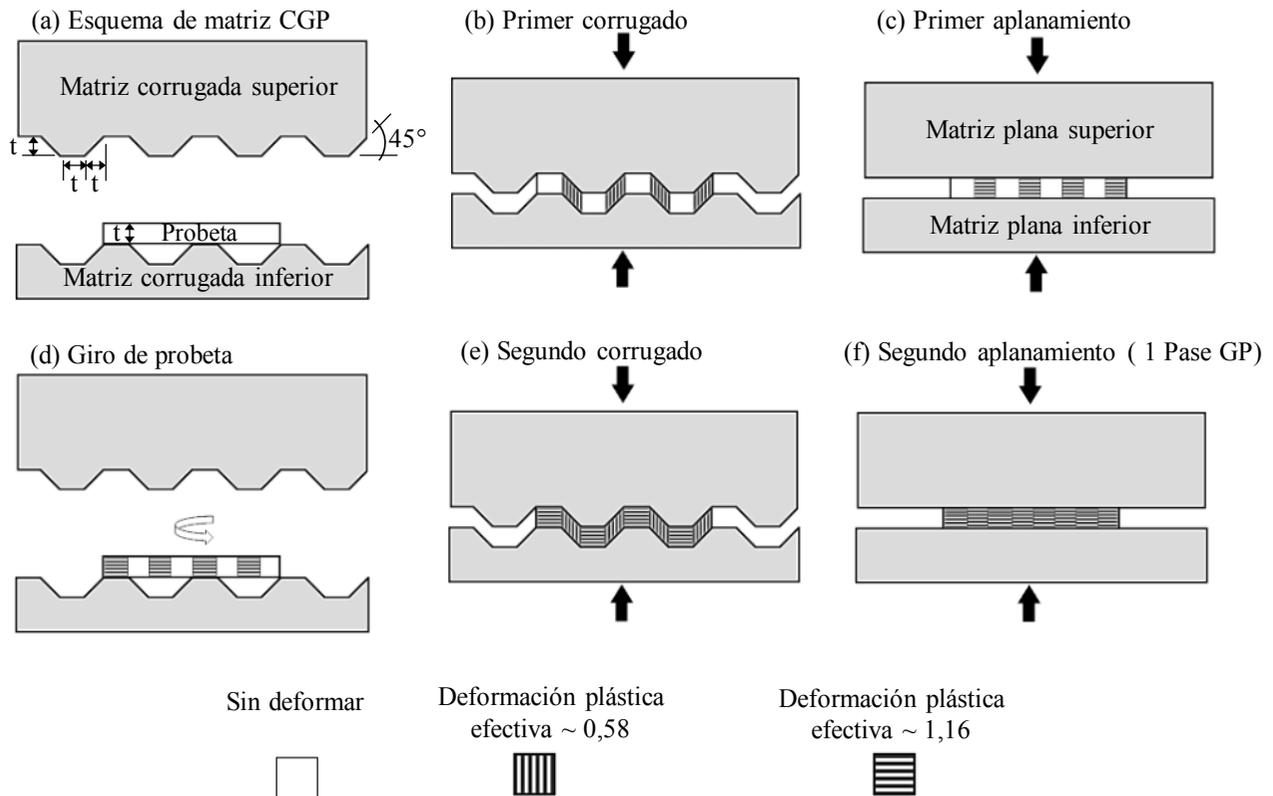
**Key words:** AISI 316L; Austenitic; Severe plastic deformation; Groove pressing; Constrained Groove pressing; Stress; Microhardness.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, debido al sinnúmero de aplicaciones estructurales que implican un alto rendimiento de los materiales, se ha estimulado el desarrollo de una gama de nuevos materiales con composiciones, microestructuras y texturas cristalográficas especiales que cumplan con estas necesidades. Entre los más destacados están los materiales nanoestructurados, los cuales presentan características especiales en comparación con los materiales de tamaño de grano grueso, como son, el aumento de la resistencia mecánica y de la dureza tanto superficial como en su núcleo, debido a la presencia de tamaños de grano a escala nanométrica [1], [2]. Una de las maneras para la obtención de materiales nanoestructurados es mediante la implementación de técnicas de deformación plástica severa (SPD, por sus siglas en inglés: *Severe plastic deformation*), las cuales consta de procesos que involucran la utilización de altos grados de deformación plástica para producir materiales con granos ultrafinos. Tales materiales pueden tener propiedades físicas y mecánicas únicas. Las técnicas SPD implican la aplicación de altas deformaciones sin cambiar las dimensiones iniciales de la muestra en el producto final. Estas operaciones se realizan mediante el uso de equipos y dispositivos de trabajo con características geométricas especiales

que impiden el flujo libre del material durante la deformación plástica, resultando en la aplicación de una alta presión hidrostática. La alta presión hidrostática combinada con un alto esfuerzo cortante resulta en una gran densidad de defectos en la red cristalina, especialmente dislocaciones, que producen un refinamiento significativo de los granos en el material. El mecanismo de deformación en los procesos SPD involucra la subdivisión de la red gruesa (granos gruesos) en áreas mucho más pequeñas (subgranos) con diferentes sistemas de cizallamiento y rotación de granos [3]. La recrystalización continua del material conduce a tamaños de granos ultrafinos y bajo ciertas condiciones de procesamiento a materiales nanoestructurados. Entre las técnicas de deformación plástica severa se encuentra la técnica de presión calibrada restringida (CGP, por sus siglas en inglés *Constrained Groove pressing*) y la técnica de presión calibrada (GP, por sus siglas en inglés *Groove pressing*), las cuales consiste en producir un cizallamiento repetitivo de láminas entre troqueles asimétricos ranurados y planos [4], [2]. La diferencia entre las técnicas radica en que la técnica GP no pose ningún tope limitante en las zonas laterales de la probeta para deformación, mientras que la técnica CGP sí los posee. El proceso GP utilizado en este trabajo se esquematiza en la figura 1.

Figura 1. Evolución de la deformación plástica durante la técnica de presión calibrada [2].  
Figure 1. Evolution of plastic deformation during the calibrated pressure technique [2].



La deformación plástica efectiva aplicada por pase, es función del espesor de la lámina y está representada por las ecuaciones planteadas por Wang y col. [5]:

$$\gamma = \tan 45^\circ = \frac{t}{t} = 1 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{\tan 45^\circ}{\sqrt{3}} \approx 0,58 \quad (2)$$

Dónde:  $t$  = espesor de la lámina a deformar,  $\gamma$  = deformación cortante,  $\varepsilon$  = deformación efectiva aplicada.

En estudios realizados con las técnicas CGP y GP con metales comercialmente puros, Shin y col. [6], redujeron el tamaño de grano de 1,2 mm a 0,8  $\mu\text{m}$  en láminas de aluminio puro de 6 mm de espesor mediante la aplicación de 4 pases por CGP. En cuanto al incremento de las propiedades mecánicas, Hosseini y col. [7], procesaron láminas de cobre con 99,3 % de pureza recocidas a 1023 K durante 3 horas y 3 mm de espesor mediante la técnica CGP, obteniéndose una resistencia a la tracción de 210 MPa. Comportamientos similares fueron reportados por Moradpour y col. [8], al procesar por CGP láminas de 3 mm de la aleación Al-Mg (AA5052) solubilizadas a 500 °C, donde se obtuvieron incrementos de la dureza del 45 % a 47 %, pasando de 56  $\text{HV}_{0,2}$  a valores cercanos a los 85  $\text{HV}_{0,2}$ . Sin embargo, no siempre se obtienen buenos resultados por CGP, por ejemplo, Wang y col. [5], al aplicar una deformación equivalente de  $\varepsilon \sim 5,8$  por CGP a láminas de níquel comercialmente puras recocidas a 750 °C durante 4 horas presentó agrietamiento superficial del material. Por ello, Khodabakhshi y col. [9], procesaron durante 4 pasadas por CGP ( $\varepsilon \sim 4,64$ ), láminas de acero de bajo carbono de 3 mm de espesor con tamaño de grano de 30  $\mu\text{m}$  utilizando como lubricante entre la lámina de acero y los troqueles de la matriz una lámina de teflón y al final se logrando un refinamiento de los granos de ferrita entre los 200 nm y 300 nm sin deterioro superficial de las láminas. En otros estudios de deformación plástica severa, Thirugnanam y col. [10], procesaron por 3 pasadas por GP, láminas de titanio comercialmente puro (cpTi) de 2 mm de espesor con un tamaño de grano inicial de 50  $\mu\text{m}$ . Los resultados mostraron una reducción significativa en el tamaño de grano después de la primera pasada (10  $\mu\text{m}$ ) y a 3  $\mu\text{m}$  después de la segunda. De acuerdo con los resultados mencionados anteriormente, en este trabajo se busca implementar la técnica de deformación plástica severa GP con el fin de incrementar la resistencia mecánica y la dureza del acero AISI 316L, mediante el refinamiento del tamaño de grano austenítico junto con variaciones en la estructura metalográfica.

## 2. METODOLOGÍA

Para este estudio, placas de 20 mm  $\times$  96 mm  $\times$  2 mm de acero inoxidable austenítico AISI 316L fueron sometidas a un recocido de homogenización a 1000 °C durante 60 minutos con un posterior enfriamiento en agua. La composición química del material fue suministrada por el fabricante en

el certificado de calidad y se resume en la tabla 1. Posteriormente, el material fue sometido a deformación plástica severa mediante la técnica GP (ver figura 1) a temperatura ambiente a una deformación máxima equivalente de  $\varepsilon \sim 4,64$  y como lubricante se utilizó disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ).

**Tabla 1.** Composición química del acero inoxidable austenítico AISI 316L en estudio (% en peso).

**Table 1.** Chemical composition of the AISI 316L austenitic stainless steel under study (% weight)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
AISI 316L en estudio	0,018	0,590	0,740	0,035	0,001	10,220	16,790	2,040	0,010

Las microestructuras fueron caracterizadas por microscopía electrónica de barrido. Las muestras fueron cortadas desde el centro de las probetas de GP y pulidas mecánicamente hasta solución de alúmina de 0,3  $\mu\text{m}$ , siguiendo procedimientos metalográficos estandarizados. El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de barrido HITACHI SUM3500 a un voltaje de 20 kV. Las propiedades mecánicas a tracción fueron evaluadas en cada probeta procesada por GP a temperatura ambiente en la dirección longitudinal. Sin embargo, con el fin de evaluar el grado de anisotropía del material de suministro, se evaluaron sus propiedades mecánicas en la dirección longitudinal (0°), transversal (90°) y a 45°. Las probetas de tracción con dimensiones calibradas de 30,72 mm  $\times$  5,76 mm  $\times$  2 mm fueron mecanizadas mediante la técnica de corte por hilo. Para las pruebas de tracción y de deformación por GP se utilizó una máquina universal de ensayo Shimadzu Autograph tipo SFL-25AG, a una velocidad inicial del cabezal de 3,33 $\times 10^{-5}$  m/s. En cuanto a la dureza, se evaluó en escala Vickers por medio de un microdurómetro Struers DuraScan 70, usando una fuerza de 1 kg (9,8 N) con un tiempo de carga de 15 s. Cada valor de dureza reportado fue el promedio de 5 indentaciones.

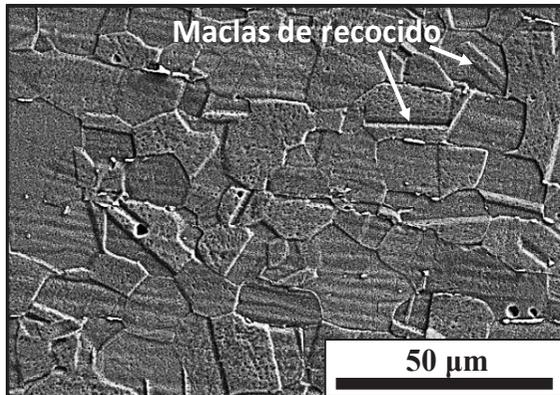
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Caracterización microestructural

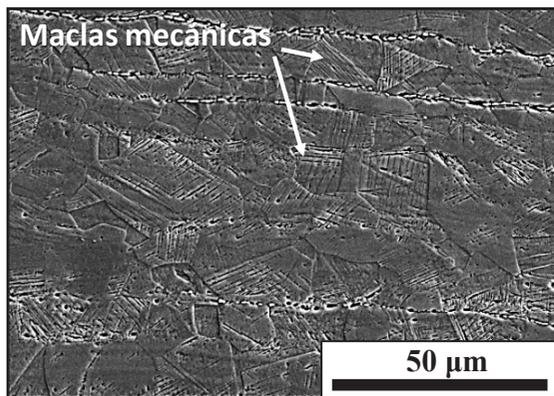
El comportamiento microestructural del acero inoxidable 316L recocido y deformado hasta 4 pases por GP se muestra en la figura 2. Se observa en la figura 2a que el material inicial presenta granos equiaxiales maclados propios de un material recocido con un diámetro medio de 22  $\mu\text{m}$ . Después del primer pase (figura 2b), se obtuvo un grano con un diámetro medio de 11  $\mu\text{m}$ , un comportamiento similar fue reportado por Satheesh y Raghu [2], durante el procesamiento por presión calibrada restringida de aluminio puro. Vale la pena resaltar, que no se pudo cuantificar el diámetro del grano después del primer pase debido a la presencia de la transformación martensítica inducida por deformación que impidió su fácil observación (figura 2c). La presencia de martensita inducida por deformación cambió el comportamiento magnético del material desde el primer pase por GP; esta fase fue detectada y cuantificada por Meysam y Hamed [11] mediante difracción de rayos X en un acero inoxidable austenítico

AISI 316, laminado en frío hasta un 80 % de reducción, ellos detectaron cambios magnéticos desde la primera reducción (30 %) hasta la última (80 %). Adicional a esto, se notó en la figura 2b la presencia de granos maclados, producto de la aplicación de una deformación plástica equivalente de 1,16. Este comportamiento fue reportado por Wang y col. [12], al realizar ensayos de tracción en acero inoxidable AISI 316 hasta una deformación plástica entre el 20 % y el 40 %.

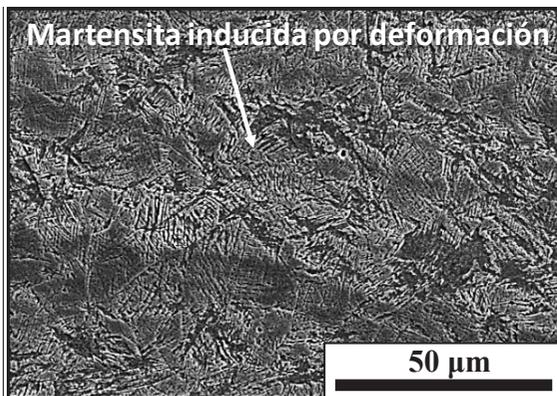
**Figura 2.** Comportamiento microestructural del material recocido y deformado por GP a) 0, b) 1 y c) 4 pases.  
**Figure 2.** Microstructural behavior of the annealed and deformed material by GP a) 0, b) 1 and c) 4 passes.



(a)



(b)

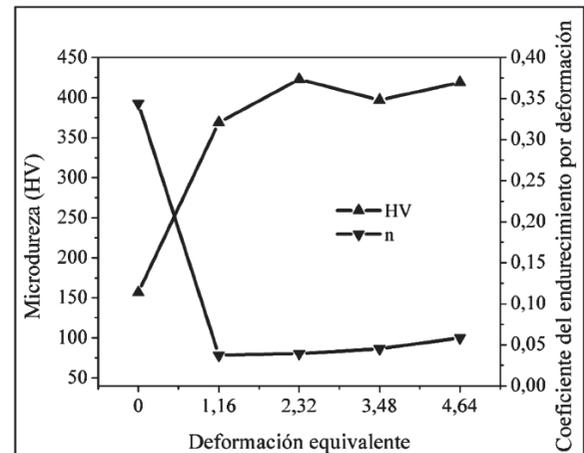
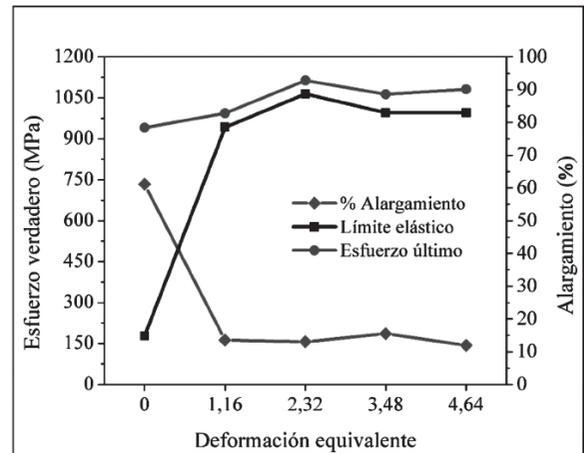


(c)

### 3.2 Caracterización mecánica

Se observa que los valores de esfuerzo, tanto de fluencia como último y la dureza se incrementan gradualmente con el aumento de la deformación plástica efectiva, hasta 2 pases por GP ( $\epsilon=2,32$ ). A partir de este valor, se presenta una saturación en el comportamiento mecánico (figura 3a y 3b), la cual es debido a la creación y aniquilación de defectos, tales como dislocaciones, vacancias, maclas, etc. Un comportamiento similar fue reportado por Hosseini y col. [7], Thirugnanam y col. [10], Khodabakhshi y col. [13], Shin y col. [6], Moradpour y col. [8] y, Satheesh y Raghu [2], al deformar por CGP cobre, titanio, acero y aleaciones de aluminio, respectivamente.

**Figura 3.** Evolución de las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L durante GP. a) Esfuerzos verdaderos y porcentaje de alargamiento y b) microdureza y coeficiente de endurecimiento  
**Figure 3.** Evolution of the mechanical properties of AISI 316L stainless steel during GP. a) True strain and percentage of elongation and b) microhardness and hardening coefficient.



En cuanto a la ductilidad, se observa una reducción significativa en el porcentaje de alargamiento del material deformado y de su capacidad de endurecimiento por deformación, lo cual se confirma con los bajos valores del coeficiente de endurecimiento “n” del orden de 0,037 para 1 pase, 0,039 para 2 pases, 0,045 para 3 pases y de 0,059 para 4 pases (ver figura 3b y tabla 2).

**Tabla 2.** Datos resumidos del ensayo de tracción y microdureza con la deformación plástica efectiva equivalente por pasada.**Table 2.** Summary data of the tensile and microhardness test with the equivalent effective plastic deformation by pass.

Pases GP	$\epsilon$	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	Alargamiento %	HV	n
0 P	0,00	177	941	61,11	157	0,344
1 P	1,16	942	994	13,56	369	0,037
2 P	2,32	1064	1114	13,05	423	0,039
3 P	3,48	996	1063	15,53	397	0,045
4 P	4,64	996	1081	11,92	419	0,059

## CONCLUSIONES

Se observó una disminución en el tamaño de grano del 50 % después del primer pase por GP en comparación con el material en estado de recocido. Adicional a esto, después de aplicar cizallamiento repetitivo hasta 4 pasadas, se observó la presencia de martensita y de maclas inducida por deformación en el acero inoxidable austenítico 316L.

Se estudió el efecto generado por medio de la técnica de deformación plástica severa con presión calibrada SPD-GP en un acero inoxidable austenítico 316L, obteniéndose una mejora significativa en la resistencia mecánica (esfuerzo de fluencia) del orden de 432% después del primer pase y en la dureza del orden de 135 %.

Se encontró una reducción significativa en la capacidad de endurecimiento por deformación del material deformado por GP, con valores bajos del coeficiente de endurecimiento “n” del orden de 0,037 para 1 pase, 0,039 para 2 pases, 0,045 para 3 pases y de 0,059 para 4 pases en comparación con el material en estado de recocido (n=0,344).

## REFERENCIAS

- [1] A. Vinogradov, Y. Estrin, Analytical and numerical approaches to modeling severe plastic deformation”, *Progress in Materials Science*, 95, 172-242, 2018.
- [2] S. S. Satheesh Kumar, T. Raghu, “Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique”, *Materials & Design*, 57, 114-120, 2014.
- [3] R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zechetbauer, Y. T. Zhu, “Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation”, *JOM*, 58, 33-39, 2006.
- [4] S. S. Satheesh Kumar, T. Raghu, “Mechanical behaviour and microstructural evolution of constrained groove pressed nickel sheets”, *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 214-220, 2013.
- [5] Z.-S. Wang, Y.-J. Guan, G.-C. Wang, C.-K. Zhong, “Influences of die structure on constrained groove pressing of commercially pure Ni sheets”, *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 205-218, 2015.
- [6] D. H. Shin, J.-J. Park, Y.-S. Kim, K.-T. Park, “Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum”, *Materials Science and Engineering: A*, 328, 98-103, 2002.
- [7] E. Hosseini, M. Kazeminezhad, A. Mani, E. Rafizadeh, “On the evolution of flow stress during constrained groove pressing of pure copper

sheet”, *Computational Materials Science*, 45, 855-859, 2009.

- [8] M. Moradpour, F. Khodabakhshi, H. Eskandari, “Dynamic strain aging behavior of an ultra-fine grained Al-Mg alloy (AA5052) processed via classical constrained groove pressing”, *Journal of Materials Research and Technology*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.016>
- [9] F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad, A. H. Kokabi, “Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties”, *Materials Science and Engineering: A*, 527, 4043-4049, 2010.
- [10] A. Thirugnanam, T. S. Sampath Kumar, U. Chakkingal, “Tailoring the bioactivity of commercially pure titanium by grain refinement using groove pressing”, *Materials Science and Engineering: C*, 30, 203-208, 2010.
- [11] M. Naghizadeh, H. Mirzadeh, “Modeling the kinetics of deformation-induced martensitic transformation in AISI 316 metastable austenitic stainless steel”, *Vacuum*, 157, 243-248, 2018.
- [12] S. J. Wang, T. Jozaghi, I. Karaman, R. Arroyave, Y. I. Chumlyakov, “Hierarchical evolution and thermal stability of microstructure with deformation twins in 316 stainless steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 694, 121-131, 2017.
- [13] F. Khodabakhshi, M. Abbaszadeh, H. Eskandari, S. R. Mohebpour, “Application of CGP-cross route process for microstructure refinement and mechanical properties improvement in steel sheets”, *Journal of Manufacturing Processes*, 15, 533-541, 2013.