

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA RUGOSIDAD Y LA DUREZA SUPERFICIAL EN PIEZAS TORNEADAS CON ASISTENCIA DE ELECTROPLASTICIDAD

Study of surface roughness and hardness in workpieces machined by a turning process assisted by electroplasticity

RESUMEN

Se presentan los resultados de un trabajo experimental destinado a determinar la variación de la rugosidad y la dureza superficial de algunos metales (aluminio 6061, latón SAE 41 y acero SAE 1020), al ser torneados en presencia de electropulsos. En el experimento diseñado se dejaron constantes los parámetros de maquinado (velocidad angular, avance y profundidad de corte), y se variaron los parámetros eléctricos (frecuencia y ancho de pulso); no obstante, solo en una región de las probetas se aplicaron los electropulsos. Se encontró que al asistir el torneado con electroplasticidad se mejoraron los acabados superficiales y disminuyeron ligeramente las durezas superficiales, lo cual permite pensar en que con estos desarrollos se abre una línea de investigación.

Palabras clave: dureza superficial, electroplasticidad, rugosidad superficial, torneado.

ABSTRACT

The results of an experimental study aimed at determining the variation of surface roughness and hardness of some metals (6061, Brass SAE 41 and SAE 1020 steel), being turned with the assistance of electropulsing are presented. In the designed experiment, the machining parameters (angular speed, feed and depth of cut) were kept constant while the electrical parameters (frequency and pulse width) were varied; only in one region of the workpiece the electropulses were applied. It can be concluded that the electrically-assisted turning process improves surface finish, and surface hardness is reduced slightly. The results can open an interesting line of research to pursue.

Keywords: *Electroplasticity, surface hardness, roughness surface, turning.*

1. INTRODUCCIÓN

La creación y aplicación de procesos de manufactura amigables, desde el punto de vista del consumo energético y de la generación y disposición de los residuos finales ([1], [2] y [3] y [4], todas de 2011), marcan tendencias actuales de desarrollo sostenible en el maquinado. En la búsqueda de estos procesos, muchos investigadores han realizado esfuerzos importantes en la creación de procesos híbridos, que comprenden procesos convencionales PC y no convencionales PNC.

Como ejemplo de procesos híbridos novedosos se encuentran estudios con resultados muy interesantes en los campos de fresado de carburo de silicio (SiC) asistido con descargas eléctricas ([5] 2011), procesos de rectificado y acabado electroquímico aplicados en torneado ([6] 2008), diseño de acabado superficial de formas libres en acabado electroquímico asistido por

CARLOS A. MONTILLA M.

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
cmontilla@utp.edu.co

ANTONIO J. SÁNCHEZ E.

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Estudiante de doctorado
Universitat Politècnica de Catalunya
antonio.gega@upc.edu

HERNÁN A. GONZÁLEZ R.

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor Agregado
Universitat Politècnica de Catalunya
hernan.gonzalez@upc.edu

VALENTINA KALLEWAARD

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
valentin@utp.edu.co

bruñido ([7] 2007), y nuevos usos de corrientes y campos eléctricos en el procesamiento por metalurgia de polvos metálicos ([8] 2000).

El torneado de piezas asistido con pulsos de corriente de alta densidad es un proceso nuevo que podría formar parte de los procesos híbridos (combinación de corte y arranque de viruta con asistencia de un proceso electrofísico) y cumpliría además con los enfoques de sostenibilidad, puesto que de él se espera, entre otras ventajas frente al torneado convencional, el mejoramiento del acabado superficial y la disminución de la potencia necesaria para el corte.

El fenómeno de la electroplasticidad modifica las propiedades mecánicas de los materiales [9], en particular la tasa de deformación plástica, y alrededor de esta aseveración se plantean las siguientes hipótesis:

- La deformabilidad de un material se puede mejorar transitoriamente en un proceso de torneado asistido por electroplasticidad, modificando los valores de densidad de corriente, y la frecuencia y duración de los pulsos de corriente eléctrica.
- El acabado superficial y la dureza del material mejoran con la aplicación de la electroplasticidad.

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar la influencia que tiene sobre la rugosidad y dureza superficial, en piezas mecanizadas en torno, la asistencia del proceso con pulsos de corriente de alta densidad y corta duración.

2. ANTECEDENTES

Desde el año 1963 fue descubierto experimentalmente el fenómeno de *electroplasticidad* ([9] 1963), es decir, la modificación de las propiedades mecánicas de un metal cuando es expuesto simultáneamente a pulsos intermitentes de corriente de alta densidad J y a un esfuerzo mecánico σ (tracción, compresión, torsión).

Con la electroplasticidad se mejora la formabilidad de un material, puesto que los pulsos conllevan la aparición del efecto *Joule* y efectos de campo magnético y eléctrico, los cuales propician el desplazamiento de las *dislocaciones* de la estructura cristalina del metal (deformación plástica), es decir, se disminuyen el esfuerzo de fluencia del material σ_f y el esfuerzo a la rotura σ_r . Así, cuando el material es sometido a un esfuerzo mecánico se deforma más fácil y rápidamente que en ausencia de los pulsos J .

Para el estudio de la electroplasticidad, típicamente los investigadores han utilizado un arreglo físico como el que se muestra en la figura 1.

En esta figura se aprecia el generador de pulsos con sus respectivos selectores de parámetros, la probeta o espécimen que se va a estudiar, el equipo para esforzar mecánicamente la probeta (tracción en este caso) y la instrumentación para registrar los parámetros de salida del proceso. Como se puede inferir, se trata de un complejo fenómeno de carácter termo–electro–mecánico.

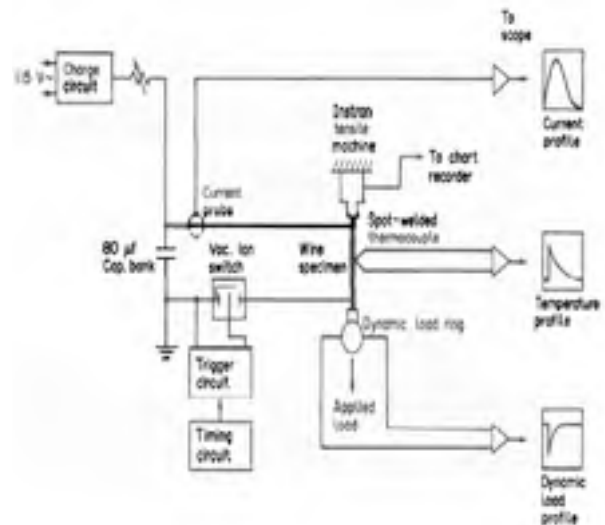


Figura 1. Esquema general de arreglo para estudio de la electroplasticidad [10].

La electroplasticidad comenzó a ser investigada activamente en el mundo desde 1980 y hoy en día se encuentran numerosos estudios teórico-experimentales que dan cuenta de que su aplicación mejora las condiciones de formabilidad del material y las propiedades finales del mismo (Referencias [10] 2012 hasta [27] 2000).

Se conocen diversos modelos físico-matemáticos, que abarcan desde modelos lineales hasta complejos modelos integro-diferenciales, como el propuesto por Kukudzhnov y Kolomiets-Romanenko ([12] 2011), que tiene en cuenta el carácter termo–electro–mecánico de un espécimen cuando es sometido simultáneamente a electroplasticidad y a una carga puntual; sin embargo, incluso este modelo dista mucho de la compleja situación que ocurre en un proceso de torneado asistido con electroplasticidad.

3. EXPERIMENTACIÓN

La configuración básica del experimento desarrollado tuvo como punto de partida el arreglo mostrado en la figura 1, y se ajusta a un esquema general como el mostrado en la figura 2.

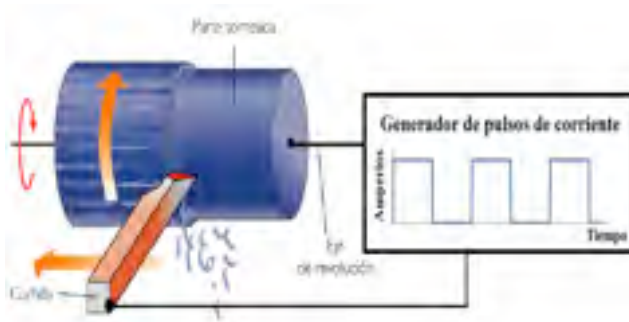


Figura 2. Vista general de transformador, generador de pulsos y multímetro Fluke.

Para este trabajo se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos de medición:

- Torno revólver ZPS.
- Generador de pulsos (figura 3). Permite la modificación de las variables eléctricas (duración y frecuencia de los pulsos). El rango de frecuencias es de 100 Hz a 400 Hz, y la duración de los pulsos puede ser 50, 100, 150 ó 200 μ s.
- Transformador de 230V primario, 60V secundario y potencia de 300W (figura 3).
- Cámara termográfica Wuhan Guide TP8S.
- Osciloscopio portátil *Fluke* 123 (figura 3).
- Rugosímetro *Mitutoyo* SJ 201.
- Durómetros *Wekstoffprüfmaschinen* y *Wilson Wolpert*.
- Barras de acero SAE 1020, de aluminio 6061 y latón SAE 41, con diámetros de 25 mm.
- Calibrador pie de rey y flexómetro.
- Portainsertos MTJNR-2525 M16 e insertos TNMG-16 para acero, latón y aluminio.



Figura 3. Esquema del proceso asistido por pulsos de corriente.

Se realizó un diseño de experimentos en el cual:

1. Se definieron, como parámetros de entrada constantes, la velocidad angular de la probeta (una para cada material), la profundidad de pasada y la longitud por

mecanizar. La tabla 1 muestra los valores de los parámetros de entrada.

Tabla 1. Parámetros de entrada del experimento.

Material	Vel. husillo (rpm)	Avance (mm/rev)	Profundidad (mm)
6061 Al	1130	0,046/0,127	0,5
SAE 41	1130	0,046/0,127/ 0,254/0,356	0,5
SAE 1020	420	0,046/0,127/ 0,254/0,356	0,5

2. Se realizaron combinaciones de las condiciones de corte, así: cuatro velocidades de avance diferentes, dos anchos de pulsos diferentes y dos frecuencias de pulso. Con base en estas combinaciones se establecieron doce ensayos, con una probeta por ensayo. Adicionalmente, para cada probeta se definieron dos zonas: en la mitad de la longitud de la probeta no se aplicaría la electroplasticidad y en la otra mitad sí se usaría. En la tabla 2 se muestran las variables eléctricas del experimento. En el caso particular de la densidad de corriente J , ha sido calculada bajo el supuesto de que el área del material es rectangular y constante.

Tabla 2. Parámetros eléctricos del experimento.

Material	Densidad de corriente J (A/mm ²)	Duración de pulso (μ s)	Frecuencia (Hz)
6061 Al	[3913-1417]	50 / 200	100 / 300
SAE 41	[3913-506]	50 / 200	100 / 300
SAE 1020	[3913-506]	50 / 200	100 / 300

3. Durante el experimento se tomaron lecturas de la temperatura instantánea de la superficie cortada (figura 4), utilizando la cámara termográfica.

4. Luego de la ejecución del experimento se tomaron lecturas de dureza Rockwell y Brinell, y de rugosidad superficial (R_a , R_z), en las dos regiones de las probetas: sin EPT y con EPT.

5. Por último, se procesó y graficó la información y se analizaron los resultados obtenidos.

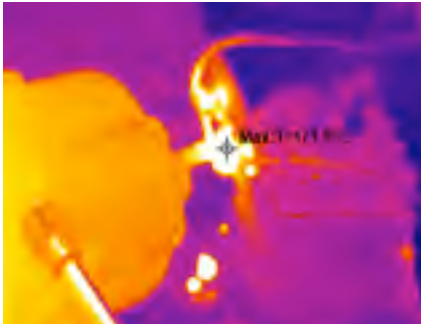


Figura 4. Toma de temperaturas de la probeta con cámara termográfica TP8S, durante el experimento

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos luego de la realización de la parte experimental se muestran en las figuras 5 a 10. Como se muestra en las primeras (las números 5, 6 y 7), el fenómeno de la electroplasticidad tiene un efecto favorable desde el punto de vista del acabado superficial final; en todos los materiales ensayados la rugosidad promedio *Ra* (líneas continuas) y rugosidad máxima pico-valle *Rz* (líneas discontinuas) es inferior en la zona donde se aplicaron los pulsos de corriente de alta densidad.

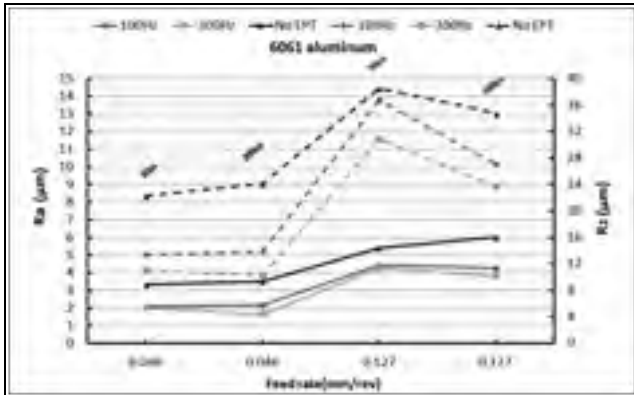


Figura 5. Gráfica de rugosidad *Ra* y *Rz* versus avance, para aluminio 6061.

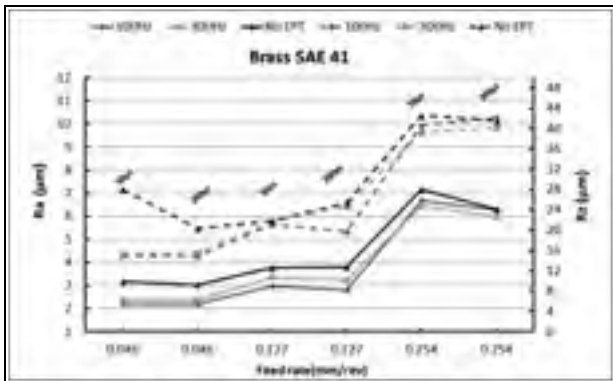


Figura 6. Gráfica de rugosidad *Ra* y *Rz* versus avance, para latón SAE 41.

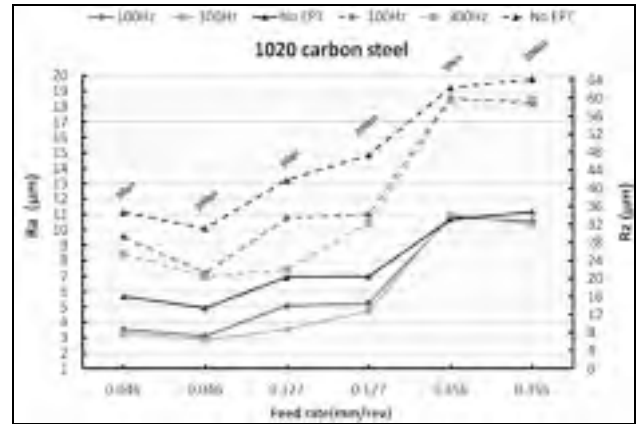


Figura 7. Gráfica de rugosidad *Ra* y *Rz* versus avance, para acero SAE 1020.

- En el caso del aluminio 6061, solamente se pudo trabajar a dos velocidades de avance de las inicialmente planteadas (0,046 y 0,127 mm/rev). Para las otras dos velocidades de avance, y dado que se trata de un material de elevada plasticidad, aparecía filo recrescido en la superficie de la pastilla y se notaba claramente el deterioro drástico del material.
- En cuanto a la dureza superficial, para el caso del aluminio 6061 se nota que, contrariamente a lo esperado, esta aumenta en la región donde se aplicaron los pulsos de corriente de alta densidad (figura 8). Esta situación probablemente se deba a que el aluminio es un material muy blando y es posible que con el mecanizado se presente endurecimiento por deformación o, alternativamente, que con las temperaturas alcanzadas con la aplicación de EPT se presente algún tipo de tratamiento superficial.

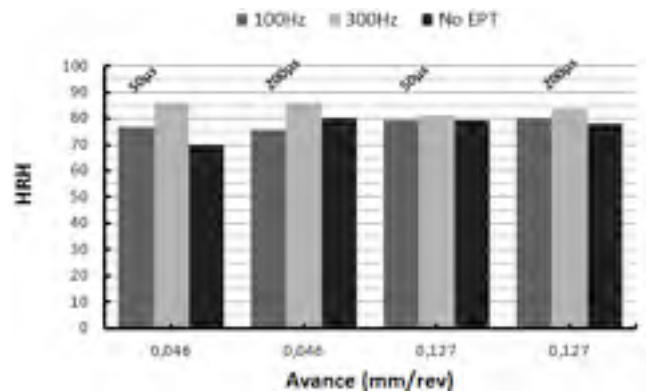


Figura 8. Variación de la dureza superficial, con EPT y sin EPT, a diferentes avances, frecuencias y ancho de pulso, para aluminio 6061.

- Para el latón SAE 61 y para el acero SAE 1020, el comportamiento observado indica que de manera general hay disminución de la dureza (respecto al

material sin EPT), en las zonas afectadas con pulsos de corriente de alta densidad (figuras 9 y 10).

- En el caso del latón SAE 41, para los tres avances estudiados, e independientemente del ancho de pulso ($50\mu\text{s}$ o $200\mu\text{s}$) se observa que la dureza es mayor para la frecuencia de 100 Hz que para la de 300 Hz (figura 9).
- En el caso del acero SAE 1020, para los tres avances estudiados, e independientemente del ancho de pulso ($50\mu\text{s}$ y $200\mu\text{s}$) se observa como comportamiento general que la dureza sin EPT es mayor que la dureza a 300 Hz y esta a su vez es mayor que la de 100 Hz (figura 10).

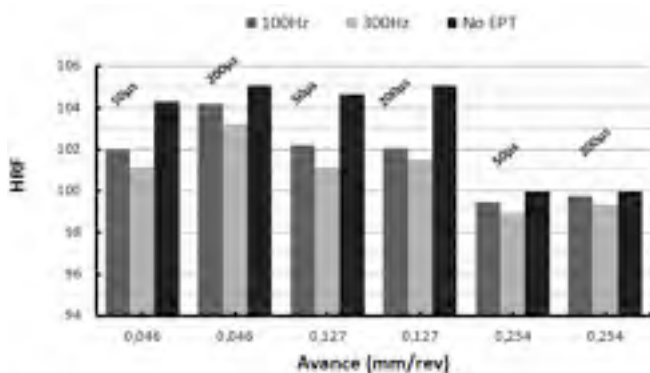


Figura 9. Variación de la dureza superficial, con EPT y sin EPT, a diferentes avances, frecuencias y ancho de pulso, para latón SAE 41.

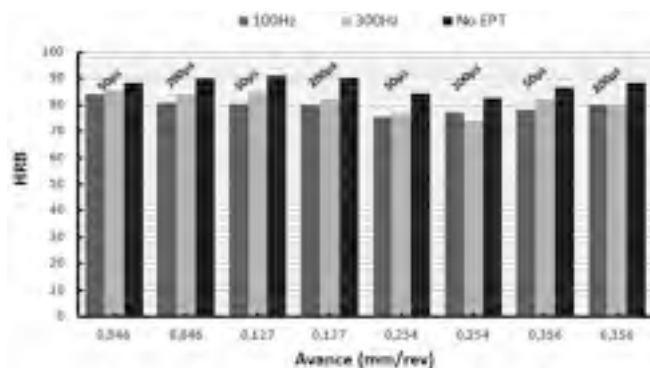


Figura 10. Variación de la dureza superficial, con EPT y sin EPT, a diferentes avances, frecuencias y ancho de pulso, para acero SAE 1020.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos hasta la fecha se puede concluir lo siguiente:

Se hizo uso exitoso del generador de pulsos de corriente de alta densidad, y con él se pudo minimizar el efecto

Joule, ya que se inducen pulsos que están en el orden de microsegundos (μs).

Se definió un protocolo de medición y visualización de resultados para el torneado asistido por electroplasticidad, el cual se podrá tomar como base para fases posteriores del estudio que se continuará realizando y permitirá integrar valores experimentales a los análisis teóricos posteriores.

Los resultados mostraron que en las regiones de las probetas en las que se aplicó el torneado asistido con EPT hay una mejora en el acabado superficial. Este comportamiento fue repetible para los tres materiales estudiados. Se hizo una comparación de estos resultados con lo obtenido por Zhang [28] en un experimento similar y se observaron comportamientos análogos en cuanto a la influencia de la EPT en la mejora de la rugosidad superficial.

Las mejoras más importantes en el acabado superficial (hasta del 46% en el aluminio) se presentaron para los avances menores de $0,046\text{mm/rev}$ y los anchos de pulso altos de $200\mu\text{s}$, mientras que las más bajas mejoras (tan solo 2% en acero 1020) se presentaron para los avances altos –de $0,254\text{mm/rev}$ – y anchos de pulso bajos de $50\mu\text{s}$. Los valores referenciados corresponden a los promedios obtenidos para las frecuencias de 100 Hz y 300 Hz.

Los resultados mostraron que en las regiones de las probetas en las que se aplicó el torneado asistido con EPT, hay una reducción en la dureza superficial del material, en latón y acero, mientras que para el aluminio ocurrió justamente lo contrario. Esto quizá suceda debido a que los pulsos de corriente han afectado las tensiones residuales superficiales y/o incluso a la estructura metalográfica de los metales; estos puntos serán objetivos de un próximo estudio de investigación.

Los resultados de este primer estudio no permiten avizorar la existencia de un modelo general de comportamiento para los diferentes materiales en cuanto a las posibles relaciones entre las variables de entrada (avance, ancho de pulso, frecuencia de excitación) respecto a las variables de salida esperadas (rugosidad superficial y dureza).

Con base en lo expuesto, se prevé que hay un largo estudio teórico-experimental por llevar a cabo, antes de obtener modelos generales de comportamiento del fenómeno de torneado asistido por el efecto de la electroplasticidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Li, A. Zein, S. Kara, y C. Christoph, "Investigation into fixed energy consumption of machine tools", *Proceedings of the 18th CIRP International 268 Conference on Life Cycle Engineering*, Technische

Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd – 4th 2011, pp. 268–273

[2] I. S. Jawahir, y A. D. Jayal, “Product and process innovation for modeling of sustainable machining processes”. Institute for Sustainable Manufacturing, *Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, University of Kentucky, Lexington, USA. 2011, pp. 299–305.

[3] R. Neugebauer, R. Wertheim, y C. Harzbecker, “Energy and resources efficiency in the metal-cutting industry”, Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology, Chemnitz, Germany. Faculty of Mechanical Engineering, Institute for Machine Tools and Forming Technology, Technical University Chemnitz, Germany. 2011, pp. 247–257.

[4] M. F. Rajemi, P.T.A. Mativenga, A. Aramcharoen, “Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations”. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester. *Journal of Cleaner Production* 18, 2010, pp. 1059–1065.

[5] R. Ji, Y. Liu, Y. Zhang, X. Dong, Z. Chen, y B. Cai, “Experimental research on machining characteristics of SiC ceramic with end electric discharge milling”, *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (6), 2011, pp. 1535-1542.

[6] P. S. Pa, “Design of continuity processes of electrochemical finishing and grinding following turning”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 22. 2008, pp. 2197-2202.

[7] P. S. Pa, “Design of freeform surface finish using burnishing assistance following electrochemical finishing”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 21. 2007, pp. 1630-1636.

[8] D. C. Newman, “Novel uses of electric fields and electric currents in powder metal (P/M) processing”. *Elsevier. Materials Science and Engineering A287*. 2000, pp. 198–204.

[9] O. A. Troitskii, y V. I. Likhtman, “The effect of the anisotropy of electron and radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state”. *Akaciemiya Nauk SSSR*. 1963, vol. 147 no. 4, pp. 814-820.

[10] A. F. Sprecher, S. L. Mannan, y H. Conrad Overview no. 49. “On the mechanisms for the electroplastic effect in metals”. Materials Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7907, U.S.A. 1986, pp. 1145-1162.

[11] C. Li, S. Jiang, y K. Zhang, “Pulse current-assisted hot-forming of light metal alloy”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol., U. K. 2012*, pp. 931–938.

[12] V. N. Kukudzhanov, y A. V. Kolomiets-Romanenko, “A model of thermo-electroplasticity of variations in the mechanical properties of metals based on defect structure reorganization under the action of pulse electric current”. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika Tverdogo Tela*. 2011, vol. 46 No. 6, pp. 814–827.

[13] V. N. Kukudzhanov, y A. V. Kolomiets-Romanenko, “Study of the influence of electric current dynamical action on mechanical properties of materials with ordered structure of defects”, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika tverdogo Tela*, no. 3. 2010, vol. 45, No. 6, pp. 465–475.

[14] A. R. Velikhanov, “Electroplasticity of undoped and doped silicon”, Institute of Physics, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, ul. 26 Bakinskikh Komissarov 94, Makhachkala, 367003 Dagestan, Russia. 2010, Vol. 44, No. 2, pp. 145–148.

[15] S. A. Barannikova, M. V. Nadezhkin, y L. B. Zuev, “On the localization of plastic flow under compression of NaCl and KCl crystals. Defects and impurity centers, dislocations, and physics of strength”, Institute of Strength Physics and Materials Sciences, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. *Fizika Tverdogo Tela*. 2009, Vol. 51, No. 6, pp. 1081–1086.

[16] S. To, Y. H. Zhu, W. B. Lee, X. M. Liu, Y. B. Jiang, y G. Y. Tang, “Effects of current density on electropulsing-induced phase transformations in a Zn–Al based alloy”. *Applied physical A. Materials Science & Processing*. 2009, pp. 939-944.

[17] V. E. Peletskii, V. D. Tarasov, y B. A. Shur, “Parameters of the polymorphic transformation in VT1-0 alloy in heating and cooling cycles”. Joint Institute of High Temperatures, Russian Academy of Science. *Metally*, No. 3, Russia. 2009, No 3, pp. 107–112.

[18] V. V. Stolyarov, U. Kh. Ugurchiev, I. B. Gurtovaya, y S. D. Prokoshkin, “Alloys with shape memory effect. Increase in the deformability of coarse-grained tin alloy rolled with superimposition of pulse current”. *Metal Science and Heat Treatment* Vol. 50, Nos. 3–4, 2008. Traducido de *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2008, Vol. 50, No. 3–4, pp. 132–135.

[19] S. V. Konovalov, V. I. Danilov, L. B. Zuev, R. A. Filipev, y V. E. Gromov, “On the influence of the electrical potential on the creep rate of aluminum”. Siberian State Industrial University. Russia Institute of

Strength Physics and Material Sciences, Siberian Division, Russian Academy of Sciences. *Fizika Tverdogo Tela*. 2007, vol. 49, No. 8, pp. 1389–1391.

[20] M. E. Twigg, R. E. Stahlbush, M. Fatemi, S. D. Arthur, J. B. Fedison, J. B. Tucker, y S. Wang, “Partial dislocations and stacking faults in 4H-SiC PIN diodes”. *Journal of Electronic Materials*. 2004, vol. 33, No. 5, pp. 472–476.

[21] W. Zhang, Z. Zhou, M. L. Sui, G. H. He, J. D. Guo, y D. X. Li, “Formation of nanoscale α -Al in a superdralumin under high current density electropulsing”. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, People’s Republic of China. *Journal of Materials Science Letters* 21, 2002, pp. 1923–1925.

[22] B. C. Valek, “Electromigration-induced plastic deformation in passivated metal lines”. *Applied Physics Letters*. January 2002, pp. 1–13.

[23] H. Conrad, y D. Yang, “Influence of an electric field on the plastic deformation of fine-grained MgO at high homologous temperatures”. Department of Materials Science and Engineering, North Carolina State University. June 2000, pp. 4045–4052.

[24] N. G. Dariavach, y J. A. Rice, “Electromigration and the electroplastic effect in aluminum SiC MMCs”. *Powder Materials Research Summary*. January 2000, pp 40–42.

[25] H. Conrad, “Electroplasticity in metals and ceramics”. *Materials Science and Engineering Department*. Elsevier A287. 2000, pp 276–287.

[26] A. A. Bychkov, y D. N. Karpinskii, “Influence of constant current on the formation of a neck in a porous bar subjected to tension”. *Strength of Materials*. 2000, vol. 32, No. 3, pp. 277–285.

[27] H. Conrad, “Space charge and the dependence of the flow stress of ceramics on an applied electric field”. Materials Science and Engineering Department, North Carolina State University. USA. 2000, vol. 44, No 2, pp. 311–316.

[28] D. Zhang, S. To, Y. Hua, H. Wang, y G. Tang, “Static electropulsing-induced microstructural changes and their effect on the ultra-precision machining of cold-rolled AZ91 alloy”. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2011*, Volume 43A, April 2012, pp. 1341–1346.