

Estudio de la deformación plástica derivada del movimiento de dislocaciones en materiales metálicos

Salas Reyes Antonio Enrique^{1*}, García Robledo Jaime Francisco¹, Altamirano Guerrero Gerardo²

Rodríguez Ortiz Gabriel³, Villanueva Pérez Omar Enrique⁴

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510, México.

²Instituto Tecnológico de Saltillo, Blvd. Venustiano Carranza 2400, Col. Tecnológico, Saltillo, Coahuila. C.P. 25280, México.

³Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Hidalgo 102, Comunidad de Valencia, Santa Cruz de Juventino Rosas, Guanajuato. C.P. 38253, México.

⁴Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Edificio "U-3", Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán. C.P. 58030, México.

*Autor para correspondencia: enriquesalas@comunidad.unam.mx

Recibido:

04/agosto/2019

Aceptado:

25/agosto/2019

Palabras clave:

Deformación plástica, dislocaciones, bandas de deslizamiento

Keywords:

Plastic deformation, dislocations, shear bands

RESUMEN

Los materiales metálicos policristalinos, formados por un gran número de granos, donde la existencia de dislocaciones permite conformarlos hasta alcanzar geometrías deseadas, representan el mayor porcentaje de aplicación en la manufactura de productos. En este trabajo se discute la deformación plástica en materiales metálicos convencionales (Cu, Sn, latón, acero 1045) y un acero avanzado de alta resistencia (TWIP), sometidos a ensayos de compresión. La microestructura y propiedades mecánicas fueron determinadas por microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y ensayos de dureza. Mediante la metodología desarrollada fue posible observar los efectos de la deformación plástica alcanzada a nivel microscópico, al identificarse líneas o bandas de deslizamiento inherentes al movimiento de dislocaciones, en planos y direcciones preferenciales, característicos de cada material. Los resultados han sido analizados y discutidos en términos de la teoría dinámica de dislocaciones.

ABSTRACT

Polycrystalline metallic materials, formed by a large number of grains, where the existence of dislocations allows forming them until reaching desired geometries, represent major percentage of application in the manufacturing of products. In this work it is discussed plastic deformation in conventional metallic materials (Cu, Sn, brass, 1045 steel) and an advanced high strength (TWIP) steel, subject to compression tests. Microstructure and mechanical properties were determined throughout optical and scanning electron microscopy techniques and hardness tests. In general, through current experimental methodology it was possible to observe the effects of reached plastic deformation at the microscopic level, by identifying slip or shear bands inherent to dislocations motion, in preferential planes and directions, own of each material. So, results have been analyzed and discussed in terms of dynamics dislocation theory.

Introducción

En 1934, de manera independiente los investigadores Orowan, Taylor, Polanyi y Burgers, demostraron el concepto y la existencia de dislocaciones en cristales de materiales metálicos (Suzuki et al., 1989), en donde bajo muchas condiciones se origina deformación plástica antes de fallar. De manera general, la deformación se relaciona con el cambio de forma de un cuerpo sólido debido a la aplicación de fuerzas externas, pudiendo tener lugar según diversos modos y en diversas direcciones que provocan distorsiones en la forma de dicho cuerpo de manera permanente (Smith y Hashemi, 1998). Por lo tanto, la deformación plástica es el resultado del movimiento de dislocaciones (deslizamiento) a través de sistemas cristalinos bajo la acción de una tensión aplicada en cristales superior al valor del límite elástico, con lo que se puede decir que las dislocaciones transportan de manera discreta el flujo plástico.

De esta manera, es bien sabido que las dislocaciones no se mueven con el mismo grado de facilidad en todos los planos y direcciones cristalográficas, sino que existen sistemas preferenciales, donde existe elevada densidad planar de átomos, de acuerdo al sistema cristalino característico. El desplazamiento se favorece en los planos de máxima compactación porque la tensión de cizalladura requerida para el deslizamiento atómico es menor que en los planos menos compactos. También se favorece el deslizamiento en direcciones de máxima compactación porque la energía requerida para mover átomos de una posición a otra es menor cuando éstos están más próximos. En consecuencia, se llama "sistema de deslizamiento" al conjunto de planos y direcciones en donde las dislocaciones pueden moverse más fácilmente (Hirt and Lothe, 198). Por ejemplo, en metales con estructura cristalina FCC como el Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, Fe etc., el deslizamiento tiene lugar en los planos octaédricos {111} que son de máxima compactación y en las direcciones de máxima compactación $\langle 11\bar{0} \rangle$.

Aunque en algunos materiales cerámicos y polímeros puede ocurrir deslizamiento, el fenómeno es de particular utilidad para entender el comportamiento mecánico de los metales. El deslizamiento les da ductilidad a los metales. Sin dislocaciones presentes, los metales no podrían ser conformados utilizando los diversos procesos (forja, extrusión, laminación, etc.) que involucran deformación plástica para obtener formas útiles.

Así, el deslizamiento no se produce sobre un plano únicamente, sino sobre pequeñas regiones de planos paralelos llamados "bandas de deslizamiento" o "líneas de deslizamiento", dependiendo de sus espesores dentro del cristal. Puesto que todas las líneas de deslizamiento están en grupos paralelos dentro de cada cristal (cada grano), deben corresponder a una misma familia de planos (hkl)

ocupados del grano particular. Por lo que a partir de mediciones sobre especímenes de monocristales con orientaciones conocidas se puede determinar: i) los planos sobre los cuales se produce el deslizamiento y ii) la dirección de deslizamiento dentro de estos planos (Asaro, 1983). Como se puede observar en la figura 1, en una barra cilíndrica de un metal monocristalino, se observa el deslizamiento causado por la deformación plástica debido a las fuerzas aplicadas en la barra, que haciendo un acercamiento, se pueden ver las líneas de deslizamiento contenidas en las bandas de deslizamiento. Como el deslizamiento es causado por esfuerzos cortantes y el límite elástico se expresa en términos de un esfuerzo cortante "crítico resuelto" que está determinado sobre el plano y dirección de deslizamiento, ocasionara el movimiento de un número suficientemente grande de dislocaciones en tal forma que se pueda observar una deformación microscópica.

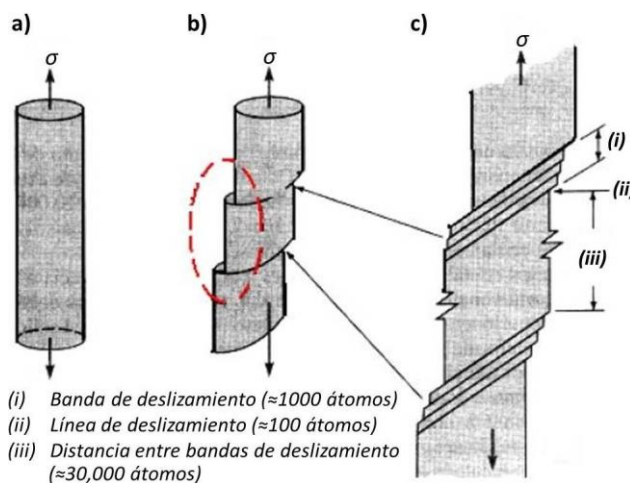


Figura 1. Formación de las líneas de deslizamiento y bandas de deslizamiento durante la deformación plástica de un monocristal metálico (Smith and Hashemi, 1998).

Bajo esta percepción, se hace posible que estudiantes de licenciatura con especialidad en metalurgia y materiales observen experimentalmente y comprendan la deformación plástica que se presenta en los materiales metálicos a nivel microscópico, en el interior de los granos, a través de la formación de bandas de deslizamiento, al ser ensayados a compresión en especímenes con superficies previamente preparadas con acabado a espejo.

Metodología

Para realizar el presente trabajo se emplearon probetas de 1 cm^3 de los materiales metálicos listados en la tabla 1, previamente recocidos, con la finalidad de tener al momento del experimento, un grano burdo suave que fuera idóneo para lograr la mejor observación microscópica. Cabe resaltar que la deformación plástica

de dichos materiales metálicos fue comparada con el comportamiento a deformación de un acero avanzado de alta resistencia (acero TWIP: Twinning-Induced Plasticity) laminado en frío en un molino reversible FENN AMCA de 25 HP de potencia. Primeramente, una de las caras, de cada cubo, fue preparada metalográficamente hasta obtener una superficie pulida a espejo (ver figura 2). Para ello, se empleó la técnica convencional de preparación de muestras de previo desbaste burdo con lijas de carburo de silicio y pulido fino con pasta de diamante de alta concentración. Posterior al pulido, se realizó una limpieza en ultrasonido por un tiempo de 10 minutos.

Tabla 1. Características de los materiales metálicos utilizados.

MATERIAL	SISTEMA CRISTALINO	COMPOSICIÓN QUÍMICA (% en peso)
Cobre (pureza comercial)	FCC	97.7%Cu - 0.5% Be - 1.8%Ni
Estaño (pureza experimental)	TI	95%Sn - 5%Bi
Latón (pureza comercial)	FCC	57%Cu-40%Zn - 2%Pb - 0.6%Fe - 0.4%Sn
Acero 1045 (pureza comercial)	BCC	98.5%Fe - 0.45%C - 0.25%Si - 0.75%Mn - 0.05%S
Acero TWIP (pureza experimental)	FCC	68.21%Fe - 0.1%C - 26%Mn - 1.9%Si - 2%Al - 0.03%Ti - 0.005%B - 0.02%S

Una vez hecho lo anterior, cada probeta fue ensayada a compresión uniaxial, empleando una velocidad del cabezal de 2 mm/s, hasta alcanzar una reducción teórica en su espesor del 20%. Así mismo, la superficie pulida fue colocada de frente al ojo del observador, con la intención de rastrear *in situ* lo que sucedía en el material al momento de la deformación. Además, para controlar el porcentaje de reducción, se siguió el desplazamiento del cabezal, medido directamente en la regla graduada del equipo hasta una marca de referencia, comprendiendo una distancia inicial y final, anticipadamente calculada. Los ensayos se llevaron a cabo en una maquina universal MORE A FEDERMAFF AG con capacidad de 50 Ton.

La observación de la superficie deformada se realizó mediante microscopía óptica (MO) y, en casos específicos, mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Los equipos empleados para este análisis correspondieron a un microscopio óptico AXIOVERT 25 y un microscopio electrónico de barrido JSC-6000 PLUS. Finalmente, la estimación de la resistencia mecánica de cada material fue realizada a través de mediciones de macrodureza en un durómetro para ensayos tipo Rockwell LOUIS SMALL, empleando las escalas B y A, según la naturaleza de cada

metal. Para ello, se realizaron tres indentaciones, en cada probeta, con una separación de 1 mm entre ellas, para evadir la deformación plástica generada por la indentación previa, según lo estipulado en la norma ASTM E18.

Resultados y discusión

En la figura 2a se puede observar la superficie de la probeta del acero 1045 tras ser deformada a compresión uniaxial. Se percibe la forma de una "X", generada por diagonales que van de esquina a esquina e inclusive, notándose el "abarrilamiento" de la probeta. El mismo comportamiento se observa en el elemento, que representa dicha acción de compresión, presentado en la figura 2b. De tal manera, que las superficies de interés, de todas las probetas ensayadas de cada material, una vez deformadas plásticamente, presentaron este patrón en forma de "X", presentando un tipo de ondas que crecen desde las aristas exteriores, donde al acercarse al centro de la probeta chocan unas con otras, formándose un ángulo visible macroscópicamente de 45°. Se resalta que este tipo de comportamiento está en función del tipo de material y de la cantidad de esfuerzo suministrado.

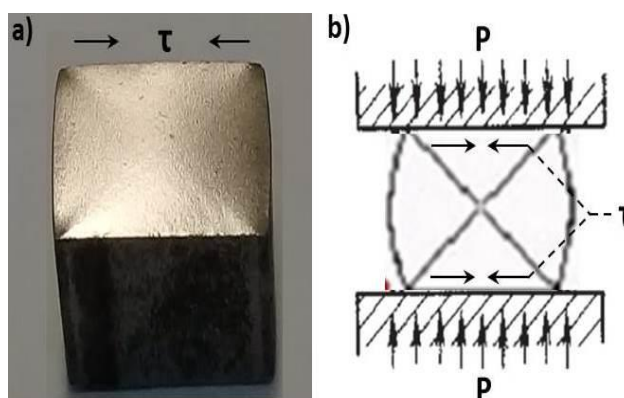


Figura 2. Comportamiento de la superficie de un material sometido a cargas de compresión: a) Probeta de acero 1045 y b) Diagrama de cuerpo libre del elemento representando la distribución de cargas.

Entonces, al someterse a compresión los materiales metálicos de naturaleza más dúctil, se deforman en la sección media, ya que en las caras laterales no actúa ninguna fuerza externa. Es decir, al momento del contacto de las caras de la probeta con los platos de agarre de la máquina universal se produce un rozamiento y éste impide el deslizamiento transversal, evidenciándose el efecto de la fricción. En consecuencia, se origina un estado tensional compuesto, siendo la razón principal de que las probetas adquieran la forma de barril, al impedirse la libre deformación transversal (Dradas and Thomas, 1983). Por ello, es bien sabido que para disminuir el efecto del rozamiento se aconseja lubricar el sistema de ensayo con una sustancia apropiada (Lovato and Stout, 1992).

Por lo tanto, los datos de carga y desplazamiento, para graficar el esfuerzo y la deformación, son más exactos para la mayoría de los materiales.

Por otro lado, la figura 3 muestra el conjunto de micrografías, obtenidas por MO, del total de las probetas ensayadas, conteniendo alta calidad visual, debido a la ganancia de emplear una superficie previamente pulida a espejo. En todos los casos, se observan claramente las líneas o bandas de deformación dentro de cada grano. Es por ello que la condición policristalina de los materiales metálicos empleados genera en la superficie pulida un grado de rugosidad. Esta rugosidad representa la orientación cristalográfica al azar de cada grano y que permite alcanzar una deformación heterogénea localmente.

Así, tanto en el cobre como en el estaño ha sido posible observar de mejor manera la formación de las líneas o bandas de deslizamiento, en comparación con el latón y el acero 1045; donde sus estructuras cristalinas no son iguales, teniendo diferente número de sistemas de deslizamiento. Sin embargo, tras el flujo plástico, la naturaleza de cada metal ensayado a compresión mantiene la misma estructura cristalina, donde en cada grano hay líneas paralelas entre sí que indican la naturaleza cristalográfica del deslizamiento y, como los granos tienen definida su orientación cristalográfica entre ellos, las líneas de deslizamiento también tienen diferente orientación entre grano y grano. Es por ello que fácilmente son observables en las micrografías.

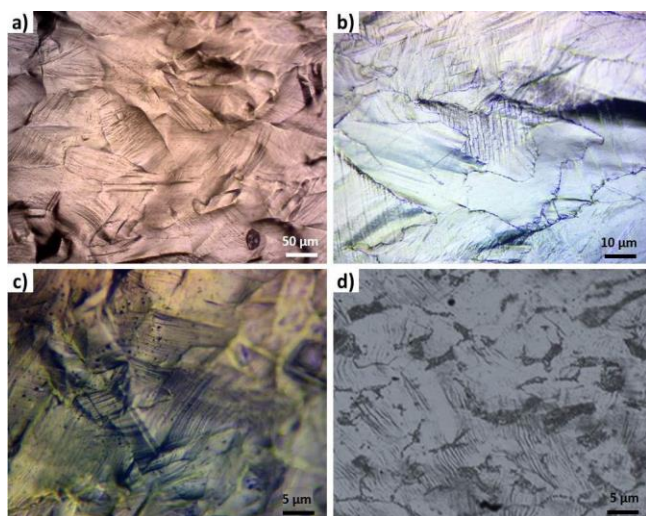


Figura 3. Observación de líneas o bandas de deslizamiento en: a) Cobre, b) Estaño, c) Latón y d) Acero 1045.

Las primeras publicaciones que refirieron la formación de líneas de deformación corresponden a los trabajos de Ewing y Rosenhain, entre los años de 1898 y 1900, al realizar estudios metalográficos en metales policristalinos deformados plásticamente (Asaro, 198). La objetividad de sus observaciones radicó en la visualización de “pequeños escalones” causados por la

aparición de “bandas de deslizamiento”, formadas a lo largo de planos cristalográficos, en la superficie de los especímenes estudiados.

Puntualmente, estas líneas o bandas de deformación pueden ser observadas microscópicamente debido a que finitas porciones de planos dentro de un limitado número de posiciones consecutivas presentan pequeñas porciones de clivaje inclinado o trepado de superficies y, cuando son observadas al microscopio óptico, bajo luz normalmente incidente, esas superficies aparecen oscuras o negras porque el haz de luz incidente no es reflejado por el lente objetivo hacia el ocular del microscopio. Consecuentemente, estas se muestran como líneas oscuras o como bandas estrechas. Entonces se dice que el deslizamiento ha ocurrido a lo largo de planos cristalográficos.

Una observación más a detalle puede ser alcanzada empujando la técnica de MEB. Así, en la figura 4 se presentan las micrografías correspondientes al estaño y al acero 1045. Intencionalmente se ha sobrepuesto un acercamiento a una zona de la superficie del estaño, con la intención de magnificar dichas bandas. Como puede observarse, las bandas de deslizamiento, formadas por la agrupación de varias líneas de deslizamiento generadas por efecto del esfuerzo de corte al moverse las dislocaciones, son uniformes ya que ocurre en muchos planos de deslizamiento, las cuales son detenidas al alcanzar los límites de grano. En términos energéticos, poca energía es requerida para que suceda el deslizamiento porque éste ocurre en aquellos planos densamente poblados, donde existen los planos más compactos de empaquetamiento atómico, por ello, las líneas o bandas de deslizamiento tienden a propagarse a medida que la deformación aumenta.

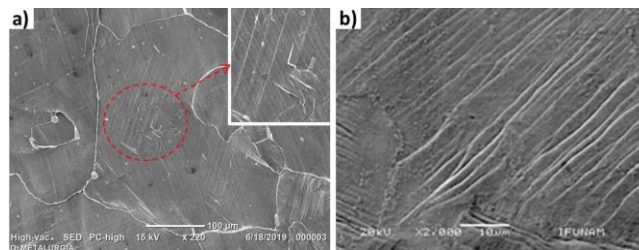


Figura 4. Observación por MEB de líneas o bandas de deslizamiento en: a) Estaño, y b) Acero 1045.

Estas características que se han presentado han sido comparadas con aquellas generadas al deformar plásticamente un acero avanzado grado TWIP, con estructura FCC y que macla por trabajo mecánico en frío. Como puede verse en la figura 5a, la generación de bandas de deslizamiento es muy evidente. Sin embargo, es muy importante resaltar que bajo esta condición no debe confundirse la ausencia de maclas dentro del grano austenítico, ya que la componente energética, en

términos del esfuerzo de corte crítico resuelto, hace que suceda el maclado mecánico (Gutierrez et al., 2010), observándose “manojos” de maclas de deformación a más altos aumentos, por ejemplo, las encerradas en el círculo rojo de la micrografía en la figura 5b.

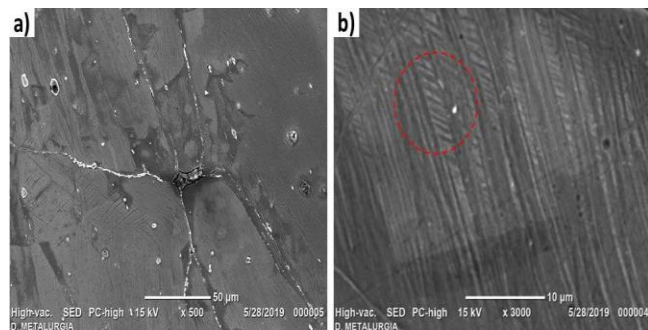


Figura 5. Micrográficas por MEB de un acero TWIP: a) Bandas de deslizamiento y b) Manojos de maclas de deformación.

Así, cuando un metal macla, la red dentro de la macla se realinea con frecuencia dentro de una orientación de planos deslizantes, los cuales se pueden alinear más favorablemente con respecto a los esfuerzos aplicados para el deslizamiento.

Lo que sí es evidente, en todos los casos estudiados, que la deformación plástica inducida tras la formación de bandas de deslizamiento, genera las condiciones para el establecimiento de texturas cristalógraficas, debido a la cinemática de una subsecuente deformación (Dillamore et al., 1979). En el caso del acero TWIP, la evolución de la textura presente permite la puesta a punto de las bandas de corte para la deformación por maclado. Es por ello que las texturas cristalógraficas determinan en gran medida la anisotropía de las propiedades mecánicas de un material metálico, y que influyen significativamente las diferentes etapas de los procesos de manufactura (de conformado mecánico de metales).

La figura 6 muestra la estimación de la resistencia mecánica de cada material metálico en función de su dureza. Los resultados muestran un incremento en el valor de la dureza desde el cobre hasta el acero 1045 (sin que guarden una relación directa entre ellos), alcanzándose 98 unidades Rockwell B para el acero 1045. Como dato extra, la dureza en el acero TWIP rebasa los 110 en dicha escala de dureza. A saber, durante la deformación plástica y, debido a la existencia de defectos dentro de los cristales, llamados dislocaciones, que al moverse permiten deslizar los planos cristalinos y, así mismo, multiplicarse, interactuar, obstaculizarse entre sí e impedirse el deslizamiento, con lo cual se hace más difícil proseguir con la deformación plástica, alcanzándose así un estado de endurecimiento del metal (Armstrong and Walley, 2008).

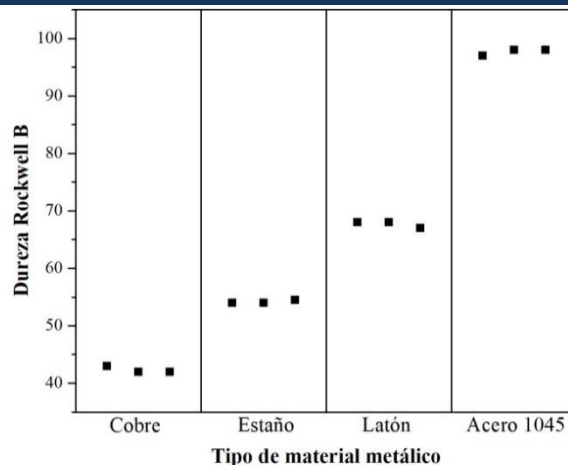


Figura 6. Perfil de dureza Rockwell B en las probetas ensayadas al 20% de deformación en compresión.

Cabe resaltar que la ductilidad de un material metálico depende del grado de compactación de los planos de deslizamiento y del número de sistemas de deslizamiento. En general, los metales con estructuras FCC son más dúctiles que los BCC por tener planos más compactos, a pesar de tener menor cantidad de sistemas de deslizamiento. Además, un aspecto importante en la conducta de endurecimiento por deformación en frío y que queda fuera del alcance de este texto, es el efecto restrictivo del tamaño de grano al movimiento de las dislocaciones, en este sentido es sabido que el borde de grano representa una barrera para el movimiento de las dislocaciones; por lo tanto, un tamaño de grano fino incrementa de manera sustancial el endurecimiento por deformación en frío. Por otra parte, el efecto de endurecimiento por solución se aprecia de manera comparativa en el cobre y el latón, en donde se observa el efecto de los átomos soluto de Zn, presentando una mayor dureza este último. Cottrell, en su teoría propone que el endurecimiento a partir de átomos solutos se produce por la interacción de estos átomos, en forma de atmósferas, con las dislocaciones (Cottrell, 1953).

Un punto fuerte a recalcar en esta discusión, es que las bandas de deformación, e inclusive las maclas, no son propiamente el resultado de una pérdida en la capacidad de cada material para endurecerse por deformación respecto de los sistemas de deslizamiento o, por el contrario, cualquier microfractura que puede estar en progreso; sino que dichas bandas se forman en un material libre de daño, pero que más tarde servirán como sitios preferenciales para que suceda el corte macroscópico, que finalmente provoca fractura. Lo anterior debido a la acumulación de grupos de bandas en los límites de grano, que por concentración de esfuerzos nuclea microcavidades (Salas, 2014). Además, macroscópicamente las bandas de deformación llegan a acumular tanta deformación que causan fractura dúctil.

Finalmente, toda esta analogía permite a los estudiantes de metalurgia y materiales llegar a la conclusión de que la deformación plástica puede ser explicada en términos de la teoría dinámica de dislocaciones y comprendida en la práctica, visualizando las líneas o bandas de deslizamiento.

Por lo tanto, con esta actividad didáctica, se priorizan los canales kinestésicos y visuales para el manejo del concepto de deformación plástica. De tal manera, que es esencial, en la formación académica de estos estudiantes, tener un buen conocimiento de cómo se comporta un metal ante la acción de un esfuerzo de tracción o de compresión, para posteriormente aplicarlo en el conformado de metales.

Conclusiones

Mediante la metodología desarrollada en esta actividad didáctica-práctica fue posible observar los efectos de la deformación plástica alcanzada por compresión, al identificarse las líneas o bandas de deslizamiento inherentes al movimiento de dislocaciones, en planos y direcciones preferenciales según cada sistema cristalino en materiales metálicos policristalinos; además de relacionar la componente deformada con el endurecimiento. Aunque el alumno de metalurgia y materiales no comprenda por completo la teoría de dislocaciones, puede relacionar el concepto de dislocación al observar en probetas deformadas las líneas o bandas de deslizamiento; activándose los canales visuales y kinestésicos que priorizan el aprendizaje. De tal manera que el concepto de plasticidad es fundamental para entender el conformado mecánico de los metales.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la DGAPA - UNAM por el financiamiento a través del proyecto PAPIIT IA104219. Al Dr. Federico Chavéz y a los profesores I. Guadarrama-Hernández y F. Gutiérrez-López de la ESIQIE-IPN por el apoyo en la fabricación del acero TWIP en sus instalaciones. Así mismo, al M. en M. S. García-Galán (FQ-UNAM), M. en M. G. Arámburo-Pérez (FQ-UNAM), M. en I. I. Chaparro-Reyes (FQ-UNAM), M. en I. J.F. Flores-Álvarez (FQ-UNAM), Dra. G. González-Mancera (FQ-UNAM), M. en C. J.R. González-Parra (FI-UNAM) y al Dr. G. Lara-Rodríguez (IIM-UNAM) por su apoyo en el desarrollo de la parte experimental, al facilitar el uso de equipo e instalaciones.

Referencias

Armstrong R. W., Walley S. M. (2008). High strain rate properties of metals and alloys. *International Materials Reviews*, 53,105-128

Asaro R.J. (1983). Micromechanics of crystal and polycrystals. *Advances in Applied Mechanics*, 23, 1-11

ASTM 18 (2018). Métodos de prueba standard para la dureza de Rockwell de materiales metálicos.

Cottrell A.H., (1953). Dislocations and plastic flow in crystals. Oxford University Press, New York.

Dillamore I. L., Roberts J. G., Bush A. C. (1979). Occurrence of shear bands in heavily rolled cubic metals. *Metal Science*, 13, 73-77

Dradas P., Thomas J. F. (1983). Compression testing of homogeneous materials and composites. R. Chait and R. Papirno, ed., ASTM STP 808, ASTM, Philadelphia, 24-39.

Gutierrez U. I., Zaefferer S., Raabe D. (2010). The effect of grain size and grain orientation on deformation twinning in a Fe-22 wt.% Mn-0.6 wt.% C TWIP steel. *Materials Science and Engineering A*, 527, 3552-3560

Hirt J. P., Lothe J. (1982). Theory of dislocations. 2nd edition, Wiley, 15

Lovato M. L., Stout M. G. (1992). Compression testing techniques to determine the stress/strain behavior of metals subject to finite deformation. *Metallurgical Transactions A*, 23, 935-951

Salas R. A. (2014). Estudio de la ductilidad en caliente de aceros Fe-Mn-C-Si-Al de plasticidad inducida por maclaje (TWIP). Tesis de Doctorado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Smith W., Hashemi J. (2006). Fundamentos de Ciencia y la Ingeniería de Materiales. 4a Ed., McGraw Hill, p. 232

Suzuki T., Takeuchi S., Yoshinaga H. (1991). Dislocation Dynamics and plasticity. 1st Edition, Springer-Verlag, 1