

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE FORMADO DE CHAPA METÁLICA

Ing. Eliezer Iván Chairez Reyes¹, Roberto Pablo Talamantes Soto³, Abel Hurtado Macías³, Dr. Delfino Cornejo Monroy¹, Dr. Pierre Giovanni Mani González²

Resumen—Presentamos aquí los resultados de una revisión de literatura extensa cuyo objetivo es identificar las propiedades de los materiales con los que se fabrican herramientas que se utilizan en el proceso de formado de chapa metálica para la industria manufacturera, con la finalidad de conocer su comportamiento en el proceso antes de presentar una fractura.

Palabras clave—Herramientas, Formado, Chapa metálica, Industria Manufacturera y fractura.

Introducción

La manufactura se define como la transformación de la materia prima a través de procesos que alteran su fisionomía para convertirla en un producto terminado. Un estudio realizado en México indica que de 1982 al 2015 el incremento de producción total fue de sólo el 2.2% una cifra relativamente baja con respecto al aumento generado de 1936 a 1981 de 6.6% (Sanchez Juárez & Moreno Brid, 2016). Debido a esto se trabaja arduamente en el desarrollo de nuevas tecnologías que generen una revolución en la manufactura nacional e impulsen su crecimiento.

Uno de los conceptos que se han investigado en los últimos años corresponde a la manufactura aditiva, la cual definen como un “método de producción digitalizada que consiste en fabricar objetos previamente modelados, mediante la el depósito de capa por capa de material, hasta conformar un objeto tridimensional (Christoph, Muñoz, & Hernandez, 2016). De acuerdo con esta definición, puede abarcar distintos sectores desde la industria de inyección de plástico hasta la industria metalúrgica.

En la industria metalúrgica se emplean herramientas de uso rudo en las cuales existe una gran cantidad de fricción generada, así como grandes esfuerzos que incurren en la fractura de las mismas, sin embargo, mediante el uso de la manufactura aditiva, aplicando una técnica denominada como depósito de metal con láser (ablación laser), se crea un recubrimiento para el metal que puede aumentar su resistencia a los esfuerzos de tensión desde un 15 hasta un 30% obteniendo con esto un mejor desempeño y aumentando el tiempo de vida de las herramientas (Bohlen, FreiBe, Hunkel, & Vollersten, 2018).

Los recubrimientos son utilizados para brindarles propiedades adicionales a los materiales, estudios demuestran que el depósito de nano-capas individual o múltiple a partir de sustratos a base de titanio y nitrógeno (TiN) ayudan a mejorar el rendimiento en los mismos otorgándoles dureza y plasticidad, especialmente en procedimientos expuestos a altas velocidades y fricción (Vereschaka, Grigoriev, Sitnikov, Bublikov, & Batako, 2018). En su mayoría, son creados mediante el depósito de películas delgadas, la cual se puede llevar a cabo por distintos métodos como lo son; el depósito físico en fase de vapor y/o la erosión catódica. Esta última, se basa en el intercambio de momento entre los iones y átomos del material debido a colisiones, obteniendo con ello menor fricción y mayor resistencia con capas más estrechas (Lince, Loewenthal, & Clark, 2019).

Se utiliza una caracterización de nano-indentación el cual nos ayuda a determinar la dureza y propiedades de plasticidad además del módulo elástico. Este proceso se basa en el análisis mediante un microscopio de escaneo electrónico de la muestra penetrada con una tasa de deformación constante (Bobzin, et al., 2015).¹



Figura 1: Herramental de formado de chapa metálica

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Departamento de Industrial y Manufactura, Ciudad Juárez, Chihuahua.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Departamento de Física y Matemáticas, Ciudad Juárez, Chihuahua.

³ Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, Chihuahua.

Descripción del Método

Objetivo General

Realizar un análisis de las propiedades de los materiales utilizados en la fabricación de herramienta para el proceso de punzonado de chapa metálica tales como: D2 Y M2, siendo el primero un acero alto al carbón y alto cromo, dimensionalmente estable, de excelente rendimiento al corte y con un módulo elástico de 206.4Gpa, mientras que el segundo se considera un acero rápido aleado al tungsteno y molibdeno satisfactorio para herramientas de corte en las que se requiere mantenimiento de filo, cuenta con una gran tenacidad y buena resistencia al desgaste, cuenta con un módulo elástico de 206.4Gpa.

Objetivos específicos

1. Analizar el comportamiento de la herramienta al ser expuesta a una carga de trabajo común de aproximadamente 10 horas diarias, para predecir el momento de la fractura de ésta y determinar su tiempo de vida útil.
2. Realizar un estudio de nano-indentación para medir la dureza y obtener el módulo de Young de la herramienta que se analizará.

Metodología

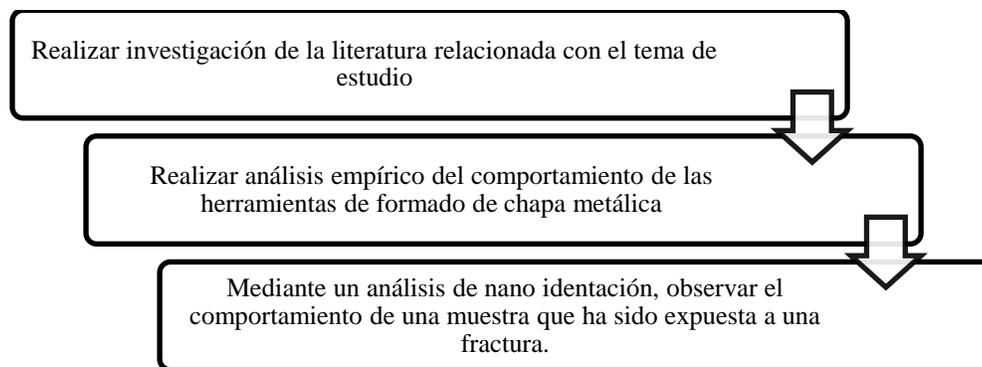


Figura 2: Metodología del desarrollo del proyecto

Para analizar los factores y las propiedades de las herramientas que se utilizan en el proceso de formado de chapa metálica realizamos una revisión de literatura acerca de procesos de manufactura, manufactura aditiva, los metales y sus propiedades, métodos de depósito de compuestos, recubrimientos y métodos de medición de propiedades mecánicas.

La revisión de literatura partió de la búsqueda en bases de datos como Elsevier, IEEE xplora, Springer, Google Scholar, identificando 81 artículos, de los cuales se seleccionaron 28 para generar el análisis de los indicadores que posteriormente ayudarán a identificar la metodología a utilizar durante el desarrollo del proyecto.

Análisis de nanoindentación

Para realizar el análisis de nanoindentación, se tomaron 2 muestras de herramienta que sufrieron fracturas durante el proceso de formado las cuales se muestran en la figura 3.



Figura 3: Muestras para analizar

Resultados del análisis de nanoindentación

Muestra 1:

Se realizó el análisis de la muestra 1 en una de las zonas claras tomando como objeto de estudio 6 pruebas, después de enfocar hasta 20 μm , tal como se observa en la figura 4, (cabe mencionar que el análisis fue en la zona más brillante) los resultados de dicho análisis se pueden observar en la figura 5 y tabla 1. De los cuales, podemos destacar

que existe una gran variación en cada una de las mediciones tanto en el módulo elástico como en el desplazamiento de la indentación a pesar de que se aplicó la misma fuerza. Lo que nos indica que la dureza y plasticidad de la pieza no es constante en toda su estructura por lo cual pudo iniciarse la fractura en uno de los puntos más débiles (parte brillante) hasta lesionar por completo la herramienta.

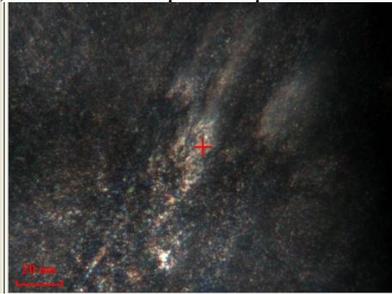


Figura 4: Imagen de la muestra 1 a 20µm

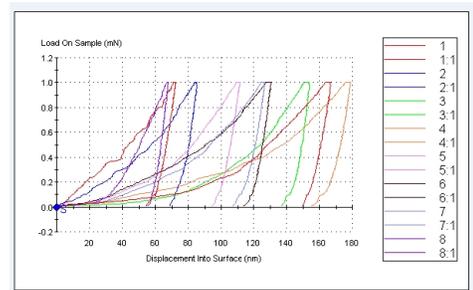


Figura 5: Resultados del desplazamiento en la superficie

Test	E	Avg E	H	Avg H	Displacement	Load	Stiffness	Drift
	GPa	GPa	GPa	GPa	nm	mN	N/m	nm/s
1		311.7		8.2				0.089
1-1	311.7		8.24		72.3	0.998	103564	
2		278.9		5.9				0.162
2-1	278.9		5.86		84.9	0.999	112667	
3		154.2		1.7				0.137
3-1	154.2		1.75		153.7	0.995	125664	
4		108.7		1.3				0.1
4-1	108.7		1.31		178.6	0.996	106428	
5		161.3		3.5				0.089
5-1	161.3		3.47		111.3	0.996	92762	
6		183.3		2.4				0.081
6-1	183.3		2.44		130.5	0.998	123703	
Mean	205.5	205.5	4.05	4	121.4	0.997	109767	0.099
Std. Dev.	94	94	2.99	3	40.6	0.002	10294	0.03
% COV	45.73	45.73	73.94	73.94	33.45	0.16	9.38	30.64
Minimum	108.7	108.7	1.31	1.3	67.8	0.995	92762	0.071
Maximum	376.6	376.6	9.2	9.2	178.6	0.999	125664	0.162

Tabla 1: Resultados del análisis de nanoindentación en la muestra 1

Muestra 2:

Para el análisis de la muestra 2, en algunas partes de su superficie se pudo observar un desfase en la escala de grises, es decir, una zona clara y una oscura tal como se muestra en las figuras 6 y 7, por lo cual se optó por hacer un análisis de ambas zonas para evaluar sus resultados.

Los resultados obtenidos al igual que con la muestra 1 presentaron una gran variación tanto entre ellos mismos como entre las distintas zonas a las cuales se les hizo el análisis. Existe una desviación estándar mayor a 267 lo cual nos indica que el módulo elástico y el desplazamiento no son constantes en la herramienta, y durante su proceso la carga no se distribuye de manera uniforme, por lo que ocasiona que en las zonas más débiles (parte brillante) se presenten las fracturas, es decir que si comparamos ambas muestras el material M2 tiende más a la fractura.



Figura 6: Imagen de la muestra de 2 a 20 μm (zona clara)

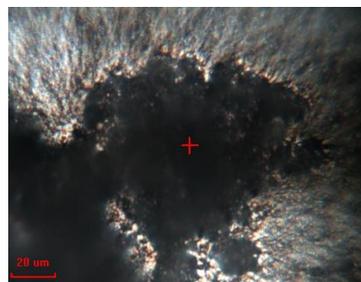


Figura 7: Imagen de la muestra 2 a 20 μm (zona oscura)

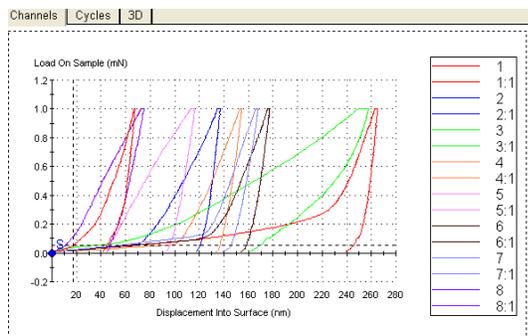


Figura 8: Resultados del desplazamiento en la superficie de la muestra 2

Test	E GPa	Avg E GPa	H GPa	Avg H GPa	Displacement nm	Load mN	Stiffness N/m
1		68.8		0.6			
1-1	68.8		0.59		265	0.995	103713
2		124.9		2.3			
2-1	124.9		2.27		137.1	0.995	91513
3		17.3		0.8			
3-1	17.3		0.76		257.4	0.995	24143
4		91.9		1.8			
4-1	91.9		1.83		154.3	0.998	77440
5		108.3		3.4			
5-1	108.3		3.38		116	0.995	65995
6		78.8		1.4			
6-1	78.8		1.37		177	0.995	77309
Mean	110.6	110.6	3.47	3.5	157.4	0.996	71275
Std. Dev.	80.9	80.9	3.64	3.6	69.9	0.001	24958
% COV	73.12	73.12	104.75	104.75	44.4	0.14	35.02
Minimum	17.3	17.3	0.59	0.6	67.6	0.995	24143
Maximum	304.4	304.4	9.79	9.8	265	0.998	103713

Tabla 2: Resultados del análisis de nanoidentación en la muestra 2 (zona clara)

Test	E GPa	Avg E GPa	H GPa	Avg H GPa	Displacement nm	Load mN	Stiffness N/m
1		96.7		2.8			
1-1	96.7	120.6	2.83	2.4	126.5	0.998	65119
2		1.5		****			
2-1	120.6	150.4	2.43	4.2	133.3	0.998	85882
3		13.2		0.1			
3-1	1.5	22.2	****	1.9	****	****	1

4		****		****			
4-1	150.4	****	4.17	****	103	0.995	79582
5		****		****			
5-1	13.2		0.08		731.2	0.996	57820
6							
6-1	22.2		1.86		180.9	0.994	19742
Mean	1.\$	1.\$	2.27	2.3	255	0.996	1
Std. Dev.	1.\$	1.\$	1.49	1.5	267.7	0.002	1
% COV	1.#R	1.#R	65.72	65.72	104.99	0.19	1.#R
Minimum	13.2	13.2	0.08	0.1	103	0.994	19742
Maximum	150.4	150.4	4.17	4.2	731.2	0.998	85882

Tabla 3: Resultados del análisis de nanoindentación en la muestra 2 (zona oscura)

Comentarios Finales

Resultados

En base a la revisión de literatura se pudieron conocer las ramas de estudio principales (metales, manufactura, métodos de deposición, recubrimientos y métodos de medición de propiedades mecánicas) además de los conceptos que cada una conlleva.

Por otra parte, mediante el análisis de nanoindentación de las herramientas fracturadas que se obtuvieron de una muestra del proceso de formado de chapa metálica, se obtuvo el módulo elástico promedio el cual es de 205.5 Gpa para la muestra 1 y 110.6 Gpa para la muestra 2, así como el desplazamiento de la nanoindentación de 121.4nm para la muestra 1 y 157.4nm para la muestra 2 en promedio.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se generó un método de trabajo que servirá para desarrollar los conceptos relacionados con el proyecto de manera ordenada y secuencial.

Además con los resultados de las pruebas de nanoindentación, se llegó a la conclusión de que tanto el módulo elástico como la dureza del material con el que están fabricadas las herramientas de formado de chapa metálica, no son constantes, es decir, existe una gran variación entre las pruebas que se realizaron en las distintas zonas de la herramienta, lo cual puede ocasionar que la distribución de la fuerza no sea uniforme y por ende, el material tienda a fracturarse en aquellos puntos donde se encuentra más frágil, es decir en partes más brillantes.

Se sugiere que una de las soluciones para evitar la fractura es obtener un material que cuente con una dureza y un módulo de elasticidad constante en toda la superficie de la herramienta para que le ayude a distribuir la fuerza de manera uniforme.

Referencias

- Bambach, M. D., Bambach, M., Sviridov, A., & Weiss, S. (2017). New process chains involving additive manufacturing and metal forming - A chance for saving energy? *Procedia Engineering*, 207, 1176–1181. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1049>
- Bobzin, K., Brögelmann, T., Brugnara, R. H., Arghavani, M., Yang, T., Chang, Y., & Chang, S. (2015). Investigation on plastic behavior of HPPMS CrN, AlN and CrN / AlN-multilayer coatings using finite element simulation and nanoindentation. *Surface & Coatings Technology*, 284, 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.081>
- Bohlen, A., Freiße, H., Hunkel, M., & Vollertsen, F. (2018). Additive manufacturing of tool steel by laser metal deposition. *Procedia CIRP*, 74, 192–195. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.092>
- Christoph, R., Muñoz, R., & Hernández, Á. (2016). *Manufactura Aditiva Additive manufacturing*. N°, 43.
- Cirp, P., Vereschaka, A., Nikolay, N., Sitnikov, N., Bublikov, I., Stief, P., Siadat, A., Andre, D. L., & Batako, D. L. (2018). Effect produced by thickness of nanolayers of multilayer composite wear-resistant coating on tool life of metal-cutting tool in turning of steel AISI 32. *Procedia CIRP*, 77(ii), 549–552. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.236>
- Cora, Ö. N., & Koç, M. (2018). Wear resistance evaluation of hard-coatings for sheet blanking die. *Procedia Manufacturing*, 15, 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.282>
- Esmael, R. I., Zakuan, N., Jamal, N. M., & Taherdoost, H. (2018). Fit manufacturing; Integrated model of manufacturing strategies. *Procedia Manufacturing*, 22, 975–981. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.139>
- Freiburg, D., Freiburg, D., & Biermann, D. (2018). Simulation-based tool development for structuring of surfaces for sheet bulk metal forming tools. *Procedia Manufacturing*, 15, 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.245>
- Hernández, C., Rivera, L. P., Camps, E., Muhl, S., & García, E. (2018). Tribological study of a mono and multilayer coating of TaZrN/TaZr produced by magnetron sputtering on AISI-316L stainless steel. *Tribology International*. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.034>

- Johansson, D., Lindvall, R., Windmark, C., & Saoubi, R. M. (2020). Assessment of Metal Cutting Tools using Cost Performance Ratio and Tool Life Analyses. *Procedia Manufacturing*, 38(Faim 2019), 816–823. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.114>
- Krajnovi, I., Daves, W., Tkadletz, M., Teppernegg, T., Klünsner, T., Schalk, N., Mitterer, C., Tritremmel, C., Ecker, W., & Czetti, C. (2016). Finite element study of the influence of hard coatings on hard metal tool loading during milling. 304, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.041>
- Kuo, C. C., & Li, M. R. (2017). Development of sheet metal forming dies with excellent mechanical properties using additive manufacturing and rapid tooling technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1–4), 21–25. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9371-0>
- Kvetková, L., Frantisek, L., Kabátová, M., & Dobrovodsky, J. (2019). The effects of deposition conditions on hydrogenation, hardness and elastic modulus of W-C:H coatings. *Journal of the European Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.12.062>
- Lasukov, A. A., & Mokhovikov, A. A. (2012). Influence of modified layer of tool on stress - Strain state of cutting wedge. *Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IFOST.2012.6357720>
- Li, C., Liu, Z. Y., Fang, X. Y., & Guo, Y. B. (2018). Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 71, 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.039>
- Libório, M. S., Praxedes, G. B., Lima, L. L. F., Nascimento, I. G., Sousa, R. R. M., Naeem, M., Costa, T. H., Alves, S. M., & Iqbal, J. (2019). Surface Modification of M2 Steel by Combination of Cathodic Cage Plasma Deposition and Magnetron Sputtered MoS₂-TiN Multilayer Coatings. *Surface & Coatings Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125327>
- Lince, J. R., Loewenthal, S. H., & Clark, C. S. (2019). Tribological and chemical effects of long term humid air exposure on sputter-deposited nanocomposite MoS₂ coatings. *WEAR an International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 433, 432–433. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202935>
- Lu, B., Li, Z., Long, H., Chen, F., Chen, J., & Ou, H. (2017). Microstructure refinement by tool rotation-induced vibration in incremental sheet forming. *Procedia Engineering*, 207, 795–800. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.831>
- Mirkoohi, E., Sievers, D. E., Garmestani, H., & Liang, S. Y. (2020). Thermo-mechanical modeling of thermal stress in metal additive manufacturing considering elastoplastic hardening. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 28, 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.01.002>
- Mizoguchi, M. (2012). Visualization and measurement of crack extensions in metal brittle fractures. *2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, MHS 2012*, 284–289. <https://doi.org/10.1109/MHS.2012.6492422>
- Nakamura, N., Mori, K., Abe, F., Abe, Y., & Zanin, A. (2018). Bending of sheet metals plastic using plastic tools made with 3D printer. *Procedia Manufacturing*, 15, 737–742. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.312>
- Neto, D. M., Coër, J., Oliveira, M. C., Alves, J. L., Manach, P. Y., & Menezes, L. F. (2016). Numerical analysis on the elastic deformation of the tools in sheet metal forming processes. i, 270–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.08.023>
- Prates, P. A., Adaixo, A. S., Oliveira, M. C., & Fernandes, J. V. (2018). Numerical study on the effect of mechanical properties variability in sheet metal forming processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 561–580.
- Sanaei, N., Fatemi, A., & Phan, N. (2019). Defect characteristics and analysis of their variability in metal L-PBF additive manufacturing. *Materials and Design*, 182, 108091. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108091>
- Schulte, R., Hildenbrand, P., Lechner, M., & Merklein, M. (2017). Designing, Manufacturing and Processing of Tailored Blanks in a Sheet-bulk Metal Forming Process. *Procedia Manufacturing*, 10, 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.059>
- Sigvant, M., Pilthammar, J., Hol, J., Wiebenga, J. H., Chezan, T., Carleer, B., & Boogaard, T. (2019). Friction in sheet metal forming: influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results. *Procedia Manufacturing*, 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.169>
- Stief, P., Dantan, J., Etienne, A., & Siadat, A. (2018). Influence of thickness of multilayer composite Ti-TiN- (Ti, Al, Cr) N on tool life of metal-cutting tool. *Procedia CIRP*, 77(Hpc), 545–548. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.237>
- Thamizhmanii, S., Yuvaraj, C., Arun, I., & Sulaiman. (2019). Effect of Feed Rate On Difficult to Cut Metals on Surface Roughness and Tool Wear Using Surface Treated and Untreated Tools. *Procedia Manufacturing*, 30, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.032>
- V, H. D. M., Perea, D., & G, G. B. (2020). Surface & Coatings Technology Development and characterization of TiAlN (Ag, Cu) nanocomposite coatings deposited by DC magnetron sputtering for tribological applications. *Surface & Coatings Technology*, 381(February 2019). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125095>
- Yang, S., McPhillimy, M., Bin, T., Supri, M., & Qin, Y. (2018). Influences of process and material parameters on quality of small-sized thin sheet-metal parts drawn with multipoint tooling. *Procedia Manufacturing*, 15, 992–999. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.395>