

Experimental study in the dry high-speed turning of AISI 316L stainless steel

**Yoandrys Morales Tamayo¹, Patricia Zambrano Robledo²,
Roberto Pérez Rodríguez³, Ricardo Ávila-Rondón⁴,
Luis Hernández González³, Yusimit Zamora Hernández¹**

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Granma. Bayamo, Cuba.
ymoralest@udg.co.cu y yzamorah@udg.co.cu

²Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica,
Universidad Autónoma de Nuevo León. Apodaca, N.L., México, patricia.zambrano@uanl.mx

³Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín. Cuba. roberto.perez@
facing.uho.edu.cu y wilfredo@facing.uho.edu.cu

⁴Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín. Cuba, ricardo@cadcam.uho.edu.cu

Abstract

The current experimental study is focused on investigating the effects of cutting parameters on flank wear in two coated carbide inserts during dry high speed finish turning of AISI 316L stainless steel. The effects of cutting parameters were determined using analysis of variance and simple regression. As a main result a significant effect of cutting feed and the machining time on flank wear was found. The three coating layers insert did not exceed the criterion of end of life of wear while the insert with one layer suffered a catastrophic wear at the highest cutting speed. The flank wear showed the best performance for the cutting feed of 0.08 mm/rev at all the speeds used in the study.

Keywords: high speed turning, flank wear, AISI 316L, experimental study, analysis of variance and regression.

Estudio experimental del desgaste del flanco en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 316L

Resumen

El presente estudio experimental se centra en investigar los efectos de los parámetros de corte en el desgaste del flanco con dos insertos recubiertos durante el torneado de acabado en seco a altas velocidades del acero inoxidable AISI 316L. Los efectos de los parámetros de corte fueron determinados utilizando un análisis de varianza y de regresión simple. Como principal resultado se obtuvo el efecto significativo del avance y del tiempo de maquinado en el desgaste del flanco. El inserto de tres capas no sobrepasó el criterio de fin de vida del desgaste, mientras que el inserto de una capa sufrió un desgaste catastrófico para la mayor velocidad de corte. El desgaste del flanco tuvo mejor comportamiento para el avance de 0,08 mm/rev en todas las velocidades empleadas en este estudio.

Palabras clave: torneado de alta velocidad, desgaste del flanco, acero inoxidable AISI 316L, estudio experimental, análisis de varianza y regresión.

Introducción

Las industrias dedicadas a la manufactura de elementos mecánicos están constantemente esforzándose para reducir costos e incrementar la calidad de las piezas maquinadas teniendo en cuenta la creciente demanda de productos con una elevada precisión dimensional.

En los últimos años el avance alcanzado en las máquinas herramientas, en las herramientas de corte y en las tecnologías de maquinado han posibilitado la utilización del maquinado de alta velocidad (HSM). Este posibilita una mayor velocidad de remoción de material, reduce los tiempos de maquinado, el número de máquinas herramientas y garantiza un elevado acabado superficial, disminuyendo las fuerzas de corte y la vida útil de la herramienta de corte [1].

La importancia de evaluar el desgaste y predecir la vida de la herramienta radica en los efectos indeseables que provoca como: una menor exactitud dimensional de la pieza terminada, tensiones residuales superficiales, deficiente rugosidad superficial y aumento de las vibraciones durante el proceso de corte [2].

Muchas soluciones para aumentar la vida de la herramienta han estado dirigidas a disminuir la temperatura en la interface herramienta-pieza mediante la utilización y desarrollo de fluidos de corte de diferentes naturalezas. La utilización de estos encarece los costos de fabricación, provoca daños en la salud de los operarios y afecta el medio ambiente. Las nuevas tecnologías para atenuar los efectos perjudiciales de los fluidos de corte se sustentan en el corte en seco, en la mínima lubricación y en el desarrollo de nuevas fórmulas de fluidos [3].

En los últimos años las investigaciones relacionadas con la evaluación de la vida útil de la herramienta han estado dirigidas a efectuar el corte de metales refrigerado, sin embargo son escasas las investigaciones relacionadas con el mecanizado en seco a altas velocidades utilizadas en el torneado de aceros inoxidable austeníticos. A continuación se muestra un resumen de los trabajos investigativos más relevantes en la elaboración de los aceros inoxidable austeníticos a altas velocidades.

M'Saoubi y otros [4] en el 1999, investigaron la influencia de los parámetros de corte como:

la velocidad de corte, el avance, la geometría y el recubrimiento de la herramienta en la tensión residual durante el corte ortogonal del AISI 316L resulturizado. Los efectos de estos parámetros fueron analizados en asociación a los eventos térmicos y mecánicos producidos durante el corte.

Lin [5] en el 2008, investigó la influencia de las condiciones de corte en la rugosidad superficial durante el torneado en seco a altas velocidades de corte de los aceros AISI 303Cu, AISI 303 y AISI 304. En este estudio utilizaron velocidades desde 250 a 450 m/min y avances entre 0,04 y 0,08 mm/rev, manteniendo constante la profundidad de corte, ellos afirman que el avance tiene una influencia directa en la rugosidad superficial obteniendo un intervalo ideal entre 0,04 y 0,06 mm/rev. Si bien este autor utiliza valores altos de velocidades para el torneado en seco, no evaluó el desgaste del flanco y solo evaluó una longitud de corte de 140 mm.

Ese mismo año, el propio autor [6], realiza junto a otros un estudio más profundo relacionado con el comportamiento de un nitruro combinado con aluminio y cromo durante el torneado a alta velocidad bajo condiciones húmedas y secas. Las variables dependientes analizadas fueron la vida útil y el desgaste del flanco, señalar que la velocidad de corte máxima fue 410 m/min.

Por otro lado Galanis y Manolacos [7] en el 2010 desarrollaron un modelo para predecir la rugosidad superficial en cabezas femorales en el torneado del acero inoxidable AISI 316L utilizando velocidades hasta 440 m/min. Estos autores, aunque trabajaron en la gama de la alta velocidad no midieron el desgaste de la herramienta de corte.

Luego, Maranhão y Davim [8], modelaron el comportamiento termomecánico del acero inoxidable AISI 316 en el torneado para determinar la influencia del coeficiente fricción de la interfaz herramienta-viruta en las fuerzas de corte, en la temperatura de corte, en la deformación plástica, en la velocidad de deformación plástica, en los esfuerzo cortante máximo y en las tensiones residuales. Para cumplir esta tarea fue necesaria una validación experimental donde emplearon una velocidad de corte de 500 m/min y carburos recubiertos como herramientas de corte.

En su artículo los autores Fernández-Abia y colaboradores [9] realizaron un modelo para

predecir las fuerzas de corte en el mecanizado a alta velocidad del acero inoxidable AISI 303, con herramientas de corte recubiertas. Para cumplir con el objetivo estudian el efecto de las condiciones de corte sobre las fuerzas de corte de forma experimental con el empleo de fluidos de corte. Las velocidades de corte desarrolladas fueron de 300 m/min a 750 /min. Este estudio no evalúa el desgaste del flanco y utiliza refrigerantes.

Por último, Hamdan y otros [10] desarrollaron una investigación a través del método Taguchi para optimizar las condiciones de corte en el maquinado de alta velocidad del AISI 304 usando herramientas de carburo recubiertas. El objetivo fundamental de esta investigación fue minimizar las fuerzas de corte y la rugosidad superficial. Las velocidades utilizadas fueron 300, 350 y 400 m/min, el parámetro con mayor significancia fue el avance de corte seguido por la velocidad. Estos autores no evaluaron el desgaste de la herramienta aunque estudiaron altas velocidades de corte.

Del análisis anterior se aprecian que las investigaciones se centran en el estudio de la rugosidad superficial, las fuerzas de corte y los menos estudiados son las vibraciones mecánicas, las deformaciones superficiales y el desgaste de la herramienta en el mecanizado de alta velocidad en seco de los aceros inoxidables.

Por tanto, esta investigación tiene como objetivo investigar la evolución del desgaste del flanco respecto al tiempo de maquinado de dos insertos de carburo recubierto durante el torneado en seco a altas velocidades del acero inoxidable AISI 316L.

Materiales y métodos

El torneado experimental fue ejecutado en condiciones secas, con el uso del torno multifuncional tipo Okuma Multus B200-W con una potencia del motor de 15 kW. La rotación del husillo oscila entre 50 y 5000 rpm y el peso máximo que soporta sobre el lado izquierdo es de 110 kg.

La probeta seleccionada fue de acero inoxidable AISI 316L muy utilizado en la fabricación de productos resistentes a la corrosión y resistentes a altas temperaturas [11]. La composición química es C 0,015%, Si 0,58%, Mn 1,50%, Cr 16,95%, Mo 2,05%, Ni 10,08%, P 0,031%, S 0,029% y N 0,059%.

Las probetas de 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud fueron torneadas con insertos recubiertos con marcación Sandvik, GC1115 y GC2015. Los recubrimientos de (TiCN–Al₂O₃–TiN) con un espesor de 15 μ m correspondieron al inserto GC2015 y para el inserto tipo GC1115 su recubrimiento fue de TiN con 5 μ m de espesor.

La geometría de los insertos fue CCMT 12 04 04-MF con rompevirutas, el portaherramienta marca Sandvik de código C6-SCLCL-45065-12 y un adaptador con código C6-391.01-63 060. El ángulo de incidencia principal fue de 7°, el ángulo de ataque fue de 0° y el radio de la punta fue de 0,4 mm. La dureza de los insertos determinada con un microdurómetro marca SHIMADZU fue 1755 HV GC1115 y 1404 HV para el inserto GC2015.

El análisis factorial completo fue el procedimiento utilizado para determinar la relación entre las variable independientes (parámetros de corte) y la variable dependiente (desgaste del flanco (w)). Un total de 64 ensayos para dos replicas fueron desarrollados con dos niveles de velocidades de corte (v), cuatro niveles de tiempo (T), dos niveles de avances de corte (f) y dos niveles de material de la herramienta, en la Tabla 1 aparecen las variables estudiadas.

En esta investigación fue asumido como fin de criterio de desgaste del flanco 0,2 mm teniendo en cuenta los resultados de la revisión de la literatura científica además de que se trata de una elaboración de acabado en seco y a alta velocidad de corte [3].

Discusión de los resultados

El objetivo del trabajo es evaluar la evolución del desgaste del flanco respecto al tiempo de maquinado de dos insertos de carburo recubierto para dos velocidades y dos avances de corte.

En la Figura 1 se muestra la medición del desgaste del flanco de los insertos para 400 m/min y 450 m/min de velocidad de corte, para 5 y 3 min de tiempo de maquinado respectivamente. Se observa que para $v = 400$ m/min y $f = 0,16$ mm/rev los insertos GC1115 (1) y GC2015 (2) no exceden el criterio de fin de vida del desgaste del flanco (200 μ m). Para la velocidad de 450 m/min y avance 0,16 m/min el inserto GC1115 (1) sufre un desgaste catastrófico sobrepasando por mucho el criterio de fin de vida del desgaste del flanco y el

Tabla 1
Variables consideradas en el estudio

v(m/min)	f(mm/rev)	T(min)	
400	0,08	0,16	2
			3
			4
			5
			0,6
450	0,08	0,16	1,2
			2
			3

inserto GC2015 (2) se aproxima a este límite, aunque no lo sobrepasa.

La utilización de elevadas velocidades de corte provoca un aumento de la temperatura en la herramienta de corte, como consecuencia debilita

la arista de corte [12]. Los insertos maquinados a 400 m/min mostraron desgaste por abrasión, adhesión y mueca. Para el caso de la velocidad de 450 m/min, el inserto GC1115 (1) presenta un excesivo desgaste revelando abrasión, adhesión, difusión, deformación plástica, y fractura del borde cortante, mientras que el GC2015 (2) muestra abrasión, adhesión, difusión, y mueca, conclusión similar a la obtenida por Jianxin *et al.* [13]

En la Figura 2a se muestra la evolución del desgaste del flanco de los insertos para $v = 400$ m/min, se aprecia un mejor comportamiento del inserto GC1115 (1) hasta 4 min de corte. Para los 5 min de maquinado el inserto GC2015 (2) obtuvo el mejor resultado en cuanto al desgaste, ninguno de los dos insertos alcanzó el límite del criterio de fin de vida. Para la velocidad de corte de 450 m/min (Figura 2b) el mejor desempeño hasta 1,2 min de corte fue también para el inserto GC1115 (1), en cambio para los tiempos restantes el des-

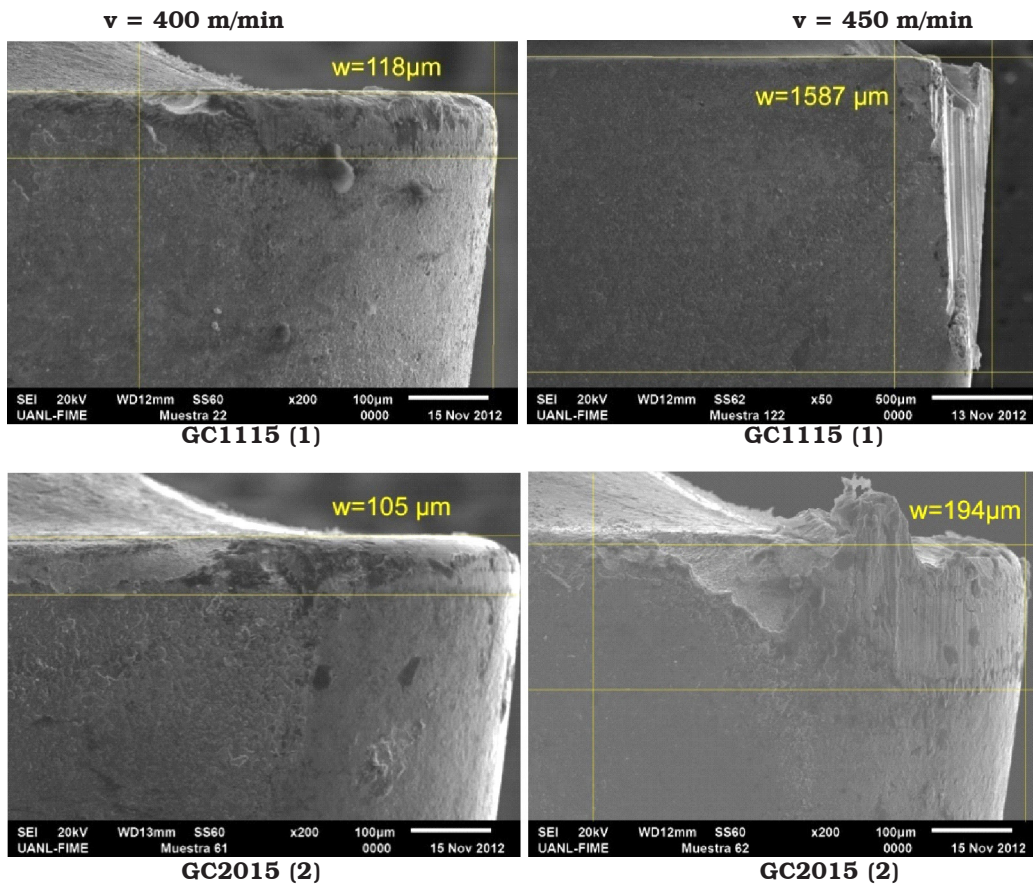


Figura 1. Desgaste del flanco (w) de los insertos para $v = 400$ m/min (5 min), $v = 450$ m/min (3 min) y $f = 0,16$ mm/rev.

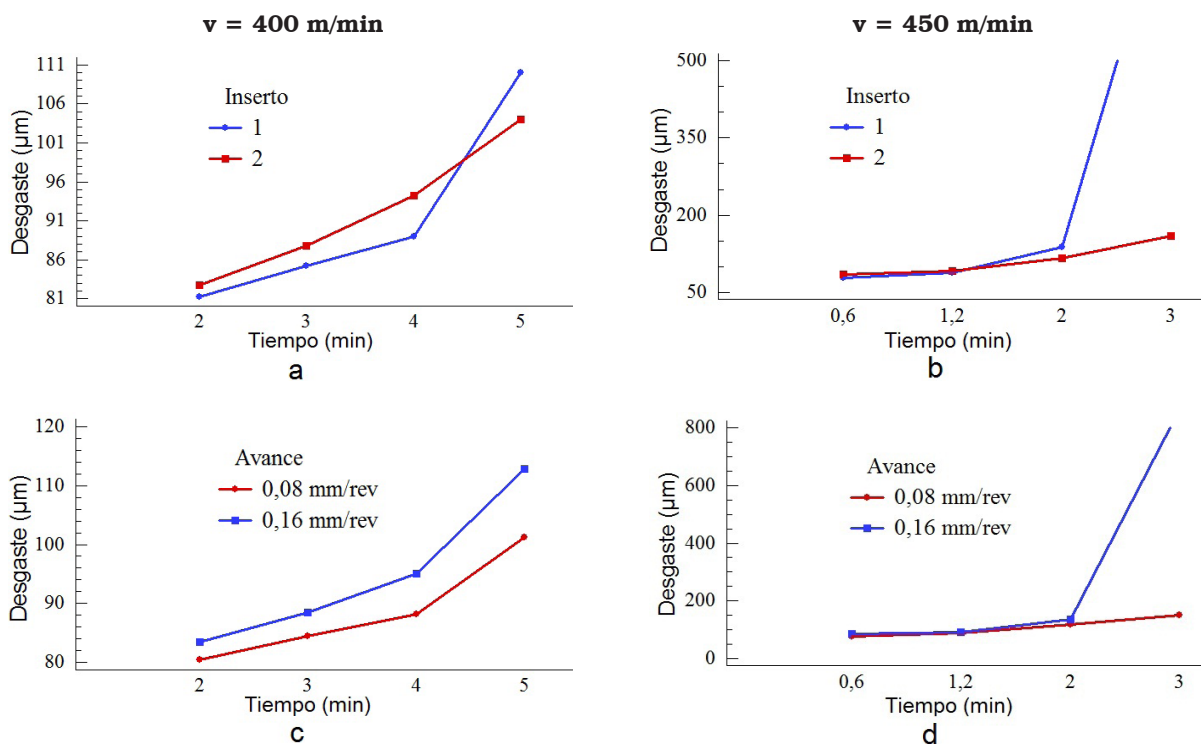


Figura 2. Evolución del desgaste del flanco (a) y (b) Inserto-Tiempo, (c) y (d) Avance-Tiempo.

gaste del flanco en sus filos de corte fue superior hasta llegar a desmoronarse antes de alcanzar el tiempo final de maquinado. Para el caso del avance en la Figura 2a y 2b es apreciable que el comportamiento del desgaste del flanco fue favorable cuando se utilizó el avance de 0,08 mm/rev en las dos velocidades. Es importante señalar que la razón del peor desempeño del mayor avance (0,16 mm/rev) es debido a que el contacto entre la herramienta de corte y la pieza en bruto aumenta, como consecuencia se acelera el desgaste, resultado similar alcanzado por Mahdavejad y Saeedy [14] y por Kalyan y Choudhury [15].

Se observó que la herramienta de menor desgaste GC2015 (2) es coincidentemente la de menor dureza, debido a que posee tres recubrimientos específicos para mejorar la mecánica del corte. La capa compuesta por Ti(N,C) le proporciona resistencia al desgaste y estabilidad térmica, la capa de Al_2O_3 le suministra resistencia al calor y el recubrimiento de TiN le aporta resistencia al calor y un bajo coeficiente de fricción [16]. Además la herramienta de mayor dureza solo presenta un recubrimiento 5 μm de espesor, mientras que la suma de los recubrimientos del inserto de tres capas alcanza 15 μm de espesor.

Se realizó el análisis de varianza para determinar los factores y las interacciones estadísticamente significativas en el desgaste del flanco y además se realizó un análisis de regresión utilizando el software STATGRAPHICS Plus versión 5.1

Análisis de varianza factorial y de regresión

El análisis del estudio experimental realizado para la velocidad de corte de 400 m/min se presenta en la Tabla 2. Se midió la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. La importancia significativa de las variables para un 95% de confianza se comprueba determinando los p-valores inferiores a 0,05. Resultaron significativos el avance de corte, el tiempo de maquinado y la interacción entre estas dos variables, por el contrario, los tipos de insertos no resultaron tener un efecto significativo en consecuencia que su p-valor es superior a 0,05.

Se realizó un análisis de regresión para describir la relación entre el desgaste del flanco de cada inserto, el tiempo de maquinado y el avance de corte, para obtener la ecuación del modelo ajustado. Además se determinó el coeficiente de

determinación (R^2) que representa la bondad del ajuste. En las Figuras 3 y 4 se muestran las ecuaciones de regresión de los modelos ajustados para cada inserto y el coeficiente de determinación para 400 m/min de velocidad de corte a través de una superficie de respuesta.

La comparación en el análisis de la varianza (Tabla 3) del desgaste del flanco para $v = 450$ m/min muestra que los insertos, el tiempo de maquinado y la interacción entre ellos tienen un efecto estadísticamente significativo en el desgaste del flanco para un nivel de confianza del 95,0%, sin

Tabla 2
Análisis de varianza factorial de desgaste del flanco de los insertos para 400 m/min

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Cociente-F	p-valor
Avance de corte	300,12	1	300,125	59,25	0,0000
Inserto	3,12	1	3,125	0,62	0,4407
Tiempo de maquinado	2503,75	3	834,583	165,61	0,0000
Inserto-Tiempo	221,62	3	73,875	14,66	0,0000
Residuo	95,75	19	5,039		
Total (corregido)	3202,00	31			

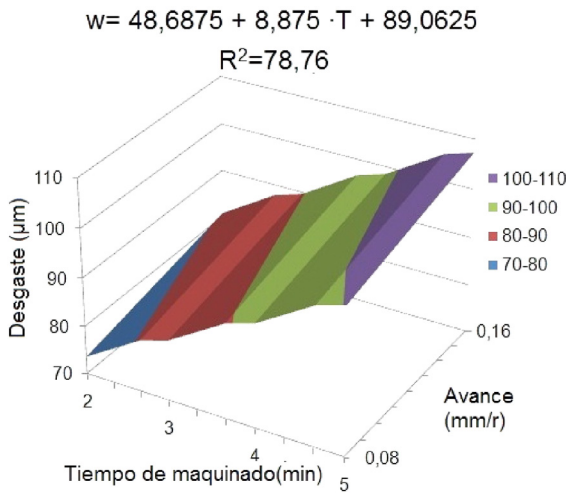


Figura 3. Análisis del desgaste del flanco del inserto GC1115 (1) para $v = 400$ m/min.

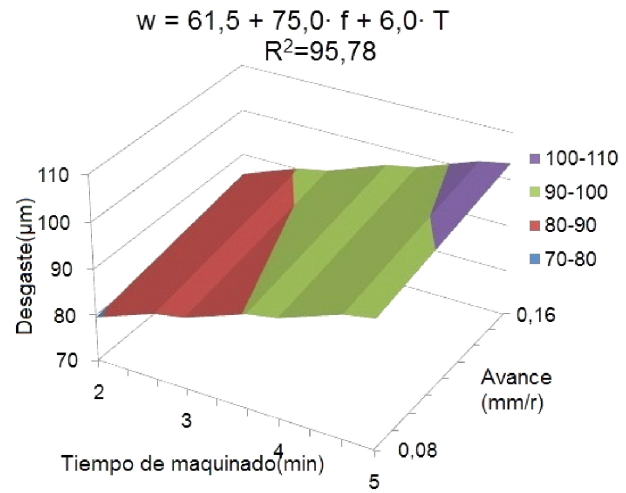


Figura 4. Análisis del desgaste del flanco del inserto GC2015 (2) para $v = 400$ m/min.

Tabla 3
Análisis de varianza factorial de desgaste del flanco de los insertos para 450 m/min

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Cociente-F	p-valor
Avance de corte	275097,0	1	275097,0	7,94	0,1100
Inserto	243428,0	1	243428,0	7,02	0,0158
Tiempo de maquinado	97439,0	3	324780,0	9,37	0,0005
Inserto-Tiempo	705615,0	3	235205,0	6,79	0,0027
Residuo	658405	19	34652,9		
Total (corregido)	3,616	31			

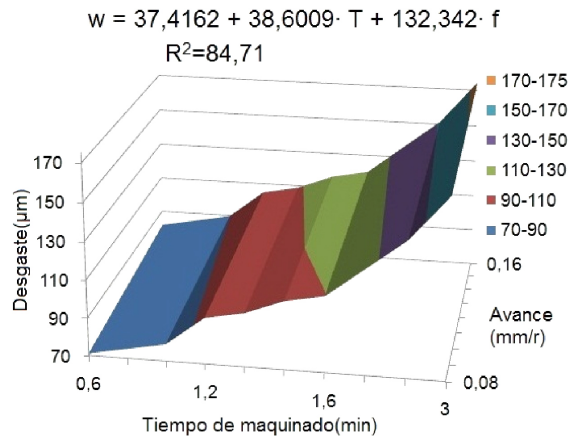


Figura 5. Análisis del desgaste del flanco del inserto GC1115 (1) para $v = 450$ m/min.

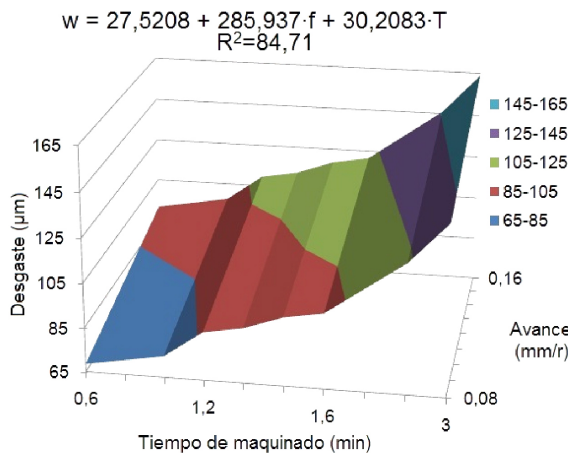


Figura 6. Análisis del desgaste del flanco del inserto GC2015 (2) para $v = 450$ m/min.

embargo el avance de corte no tuvo un efecto tan significativo para este nivel de confianza. Los resultados del análisis de regresión para describir la relación entre el desgaste del flanco de los insertos, el avance de corte y el tiempo de maquinado para velocidad de corte (450 m/min) se observa en la superficie de respuesta (Figuras 5 y 6).

Conclusiones

Basados en los análisis y resultados del estudio del desgaste de la herramienta durante el torneado del acero AISI 316L se llegó a las siguientes conclusiones:

El desgaste del flanco aumentó con el tiempo de maquinado para las velocidades de corte utilizadas en el estudio.

Para la velocidad de corte (400 m/min) el mejor desempeño corresponde al inserto GC1115, mientras que el inserto GC2015 tuvo el mejor comportamiento para la velocidad de 450 m/min.

El desgaste del flanco tuvo mejor comportamiento para el avance de 0,08 mm/rev en todas las velocidades empleadas en este estudio.

El análisis de varianza factorial demostró que el avance de corte y el tiempo de maquinado tienen un efecto significativo para un nivel de confianza del 95%.

Según las ecuaciones de regresión lineal simple para las condiciones de corte utilizadas en este estudio se recomienda: maquinar con los insertos GC1115 y GC2015 cuando se utiliza 400 m/min para 5 min de corte y cuando se utiliza 450 m/min el inserto GC2015 para 3 min y hasta 2 min para el inserto GC1115.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la SEP por proporcionar la beca postgraduada de investigación en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en México. Se le agradece al Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica por el apoyo financiero, tecnológico y por todas las facilidades brindadas para el desarrollo del trabajo de investigación. Se agradece al Departamento de Ciencias Técnicas de la Universidad de Granma por el apoyo brindado.

Referencias

1. L. W. Hernández, R. Pérez, P. Zambrano, M. Guerrero and P. Dumitrescu, "Estudio del desgaste del flanco de carburos recubiertos y cermet durante el torneado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045". *Revista de Metalurgia*, Vol. 47, No. 3 (2011) 262-272.
2. R. Suresh, S. Basavarajappa and G. L. Samuel, "Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool". *Measurement*, Vol. 45, No. 7 (2012) 1872-1884.

3. S. E. Cordes, "Thermal stability of α -alumina PVD coatings and analysis of their performance in machining of austenitic stainless steels". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 5, No. 1 (2012) 20-25.
4. R. M'Saoubi, J. C. Outeiro, B. Changeux, J. L. Lebrun and A. Morão Dias, "Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 96, No. 1-3 (1999) 225-233.
5. H. M. Lin, "The study of high speed fine turning of austenitic stainless steel". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 27, No. 2 (2008) 191-194.
6. Y.-J. Lin, A. Agrawal and Y. Fang, "Wear progressions and tool life enhancement with Al-CrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing". *Wear*, Vol. 264, No. 3-4 (2008) 226-234.
7. N. Galanis and D. Manolakos, "Surface roughness prediction in turning of femoral head". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1 (2010) 79-86.
8. C. Maranhão and J. Paulo Davim, "Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: Numerical simulation and experimental validation". *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 18, No. 2 (2010) 139-156.
9. A. Fernández-Abia, J. Barreiro, L. López de Lacalle and S. Martínez-Pellitero, "Behavior of austenitic stainless steels at high speed turning using specific force coefficients". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2012) 1-11.
10. A. Hamdan, A. Sarhan and M. Hamdi, "An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 1 (2012) 81-91.
11. V. Gaitonde, S. Karnik, B. Siddeswarappa and B. Achyutha, "Integrating Box-Behnken design with genetic algorithm to determine the optimal parametric combination for minimizing burr size in drilling of AISI 316L stainless steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 3 (2008) 230-240.
12. G. Bartarya and S. K. Choudhury, "State of the art in hard turning". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 53, No. 1 (2012) 1-14.
13. D. Jianxin, Z. Jiantou, Z. Hui and Y. Pei, "Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels". *Wear*, Vol. 270, No. 7-8 (2011) 520-527.
14. R. Mahdavejad and S. Saeedy, "Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel". *Sadhana*, Vol. 36, No. 6 (2011) 963-970.
15. K. V. B. S. Kalyan and S. K. Choudhury, "Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1-3 (2008) 95-101.
16. R. Suresh, S. Basavarajappa, V. N. Gaitonde and G. L. Samuel, "Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert". *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 33, (2012) 75-86.

Recibido el 2 de Mayo de 2013

En forma revisada el 16 de Junio de 2014