



Comportamiento de la fuerza de corte en el maquinado de aleaciones termorresistentes con una herramienta cerámica BIDEMICS

Behavior of cutting force in the machining of heat resistant alloys with a ceramic tool BIDEMICS

Ricardo del Risco-Alfonso^I, Roberto Pérez-Rodríguez^{II,*}, Marcelino Rivas-Santana^{III},
Patricia del Carmen Zambrano-Robledo^{IV}

I. Universidad de Camagüey, Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas, CEEFREP. Camagüey, Cuba.

II Universidad de Holguín, Centro de Estudios de CAD/CAM. Holguín, Cuba.

III. Universidad de Matanzas, Centro de Estudios de Manufactura Avanzada y Sostenible, CEFAS. Matanzas, Cuba.

IV. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia: roberto.perez@uho.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 7 de febrero de 2022 Aceptado: 19 de marzo de 2022

Resumen

En la industria se utilizan frecuentemente aleaciones de titanio y aceros inoxidable, los cuales son considerados materiales de pobre maquinabilidad, característica que afecta considerablemente las variables de fuerzas de corte, rugosidad superficial, desgaste de la herramienta de corte, entre otras. El objetivo del presente trabajo fue analizar el comportamiento de la fuerza de corte principal al mecanizar dos aleaciones termorresistentes de AISI 316L y Ti-6Al-7Nb, ambas mecanizadas con una herramienta cerámica BIDEMICS. Se utilizó un torno CNC de alta velocidad, un

dinamómetro para medir las fuerzas de corte Kistler y un diseño factorial completo para los experimentos. Se demostró el comportamiento favorable de la herramienta de corte cerámica BIDEMICS para maquinar este tipo de aleaciones en cuanto a las fuerzas de corte que se generan en el proceso de corte.

Palabras claves: fuerza de corte; aleaciones termorresistentes; herramienta de corte BIDEMICS.

Abstract

In the industry, titanium alloys and stainless steels are frequently used, which are considered poor machinability materials, a characteristic that considerably affects the variables of cutting forces, surface roughness, wear of the cutting tool, among others. The objective of this work is to analyze the behavior of the main cutting force when machining two heat-resistant alloys AISI 316L and Ti-6Al-7Nb, both machined with a BIDEMICS ceramic tool. A high-speed CNC lathe, a dynamometer Kistler to measure cutting

forces, and a full factorial design were used for the experiments. The favorable behavior of the BIDEMICS ceramic cutting tool was demonstrated to machining this type of alloys in terms of the cutting forces generated in the cutting process.

Key words: cutting force; heat resistant alloys; BIDEMICS cutting tool.

Cómo citar este artículo:

del Risco Alfonso R, Pérez Rodríguez R, Rivas Santana M, Zambrano Robledo P. Comportamiento de la fuerza de corte en el maquinado de aleaciones termorresistentes con una herramienta cerámica BIDEMICS. Ingeniería Mecánica. 2022;25(2):e645. ISSN 1815-5944.

1. Introducción

A partir del desarrollo acelerado de los materiales de ingeniería y su utilización intensiva en la industria aeronáutica, espacial y biomédica en los últimos años, se identifican numerosas investigaciones relacionadas con el estudio de la maquinabilidad y demás variables de interés. En el caso de las aleaciones termorresistentes, se observa una tendencia a su utilización cada vez más creciente en la industria, que ha generado el desarrollo de nuevos materiales para herramientas de corte, como es el caso de las herramientas de corte cerámicas BIDEMICS.

Autores como Tezuka et al. [1] propusieron un método para la evaluación de la adherencia en el corte. Realizaron el torneado de un acero al carbono, una aleación de titanio y una aleación súper resistente al calor a base de níquel. Los componentes dinámicos de la fuerza de corte se midieron con un dinamómetro piezoeléctrico. La tendencia a la adhesión la valoraron a través de un índice definido entre un acero al carbono S45C, una aleación de titanio Ti-6Al-4V y una aleación súper resistente al calor a base de níquel Inconel718, lo que arrojó un buen resultado con las reglas empíricas. Los autores no utilizaron herramientas cerámicas.

Por su parte, Manohar et al. [2] sometieron la aleación de Inconel 718 a experimentos de torneado. Los datos experimentales recopilados se utilizaron para construir modelos empíricos, cuyo rendimiento se evaluó mediante un enfoque estadístico. Se estableció que los modelos desarrollados podrían usarse para predecir los parámetros de salida para un conjunto de parámetros de entrada a través de gráficos 2-D (superficie) y 3-D (contorno). Los autores analizaron las variables de fuerzas de corte y la rugosidad superficial, pero utilizaron como herramientas de corte un carburo de tungsteno de grano fino con recubrimiento CVD, no utilizando herramientas cerámicas.

A su vez, Tan et al. [3] analizaron el mecanismo de desgaste en dos herramientas cerámicas, al maquinar la aleación Ti-6Al-4V. Como resultado, se obtuvo que el mecanismo de desgaste principal fue el adhesivo, aunque también se observó el astillado en una de las herramientas. La alta resistencia al desgaste de las herramientas de corte TiB₂-B₄C se atribuye a una mayor resistencia térmica, mayor dureza y menor afinidad química con el titanio en comparación con los carburos de tungsteno, lo que los convierte en materiales muy prometedores para el mecanizado de alta velocidad de aleaciones de titanio. Los autores estudiaron el desgaste de la herramienta, pero no analizaron las fuerzas de corte y las herramientas de corte cerámicas no son del tipo BIDEMICS.

Por otro lado, Parenti et al. [4] realizaron el mecanizado del Hastelloy C276 bajo diversas condiciones de mecanizado (velocidad, avance y profundidad) y ambientes (seco y criogénico). Se investigó la maquinabilidad del Hastelloy C276 a través de las fuerzas de maquinado, la temperatura, la rugosidad superficial y la dureza bajo diferentes condiciones de corte. Los experimentos de torneado que resultaron de utilizar el lubricante LN₂ redujeron drásticamente la temperatura hasta en un 40 %. Las fuerzas de mecanizado fueron mínimas bajo el mecanizado criogénico debido a su propiedad de lubricación efectiva. Pero no se observó una diferencia significativa en el desgaste para ambos tipos de mecanizado. La maquinabilidad del Hastelloy C276 mejoró significativamente cuando se usó LN₂ como fluido de corte. En la investigación, los autores utilizaron insertos del tipo CNMG 120408 (no cerámicos) y analizaron las diferentes componentes de las fuerzas de corte y la rugosidad superficial.

Al mismo tiempo, Parenti et al. [5] investigaron el proceso de corte y el desgaste de una fresa cerámica de vástago de $\varnothing 12$ mm AbstractSolid fabricada con SiAlON, para el fresado de Inconel 718. Se estudiaron los mecanismos de desgaste, al igual que sus efectos en las fuerzas y potencia de corte, medidos a través de sensores integrados al CNC. El experimento permitió determinar que el atascamiento de la herramienta y el astillado de los filos fueron los principales fenómenos de corte que provocaban el desgaste de la herramienta. Al mismo tiempo, se encontró que la velocidad de corte aumenta la potencia de corte más en el fresado ascendente que en el fresado descendente. Si bien el estudio se refiere a las fuerzas de corte y la rugosidad superficial con una herramienta cerámica, se realizó en el proceso tecnológico de fresado, no incluye el torneado. Ma et al. [6] desarrollaron un trabajo de investigación similar.

Entretanto, Yu et al. [7] en su estudio utilizaron herramientas de cerámica para tornear una super aleación a base de níquel (GH4169). Analizaron la fuerza de corte y los patrones de desgaste. Los resultados demostraron que la fuerza de impacto es mayor que la fuerza de corte promedio. Las fracturas, el astillado y la adhesión son las principales características de desgaste de las herramientas de cerámica de este tipo. Además, demostraron que el desgaste adhesivo, abrasivo y por difusión es el principal mecanismo de desgaste. Los autores no utilizaron herramientas cerámicas del tipo BIDEMICS.

Adicionalmente, Jadhav y Mohanty [8] propusieron una investigación experimental y la optimización de los parámetros del proceso de torneado criogénico de la superaleación Nimonic C-263 con un inserto CVD multicapa. Se estudió la rugosidad de la superficie, el desgaste de la punta y las fuerzas de corte en un entorno de mecanizado híbrido criogénico. Se determinó que el avance es el parámetro que más influye en el análisis de varianza (ANOVA). El estudio no utilizó herramientas de corte cerámicas.

Recientemente, del Risco-Alfonso et al. [9] realizaron un estudio de los mecanismos de desgaste en el mecanizado del acero AISI 316L con una herramienta cerámica BIDEMICS. Los autores se centraron en identificar la dependencia entre la fuerza de corte principal, la velocidad inicial de desgaste de la herramienta, la rugosidad superficial y los parámetros del régimen de corte. En base a estas dependencias, se propuso un modelo de optimización multiobjetivo para minimizar la energía consumida y la tasa de desgaste inicial, así como maximizar la productividad, manteniendo los valores de rugosidad superficial por debajo de los establecidos por la norma ISO 5832-1. No se refieren al estudio comparativo de las fuerzas de corte en el mecanizado de varios aceros termorresistentes.

Del análisis anterior se aprecia que aunque se han desarrollado investigaciones relacionadas con el análisis de las fuerzas de corte en el mecanizado de piezas termorresistentes con herramientas cerámicas y no cerámicas, aún se requieren de estudios donde se caracterice el comportamiento de las fuerzas de corte cuando se mecanizan estos materiales, utilizando las herramientas BIDEMICS.

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento de la fuerza de corte principal al mecanizar dos aleaciones termorresistentes de AISI 316L y Ti-6Al-7Nb, ambas mecanizadas con una herramienta cerámica BIDEMICS. Se utilizó un torno CNC de alta velocidad, un dinamómetro para medir las fuerzas de corte Kistler y un diseño factorial completo para los experimentos. Se demostró el comportamiento favorable de la herramienta de corte cerámica BIDEMICS para maquinar este tipo de aleaciones en cuanto a las fuerzas de corte que se generan en el proceso de corte.

2. Métodos y Materiales

El estudio experimental se basó en una operación de cilindrado exterior, utilizando como máquina herramienta un torno CNC HAAS-ST 10 (HAAS Automation Europe) con una capacidad máxima de 356 X 406 mm, 11,2 kW de potencia y 6 000 rpm en el husillo. El desgaste de la herramienta de corte se midió con la ayuda de un microscopio de barrido electrónico EVO MA 25 de Zeiss (Zeiss). Las fuerzas de corte fueron medidas con un dinamómetro KISTLER (Kistler Instrument Corp.).

El maquinado se realizó en primer lugar sobre una barra de 25 mm de diámetro, de la aleación Ti-6Al-7Nb y en segundo lugar sobre una barra, también de 25 mm de diámetro de acero inoxidable austenítico AISI 316L (ver Fig. 1). A cada probeta se le midió la dureza en cinco puntos diferentes de la periferia, a 20 mm de separación y en cinco puntos en el núcleo. Una en el centro y las restantes cuatro en una circunferencia de 22 mm de diámetro. Para la medición de la dureza fue utilizado un Durómetro Wilson Rockwell. Los valores obtenidos fueron de 47,8 HRC para las barras de Ti-6Al-7Nb y 149 HB para la de acero AISI 316L.

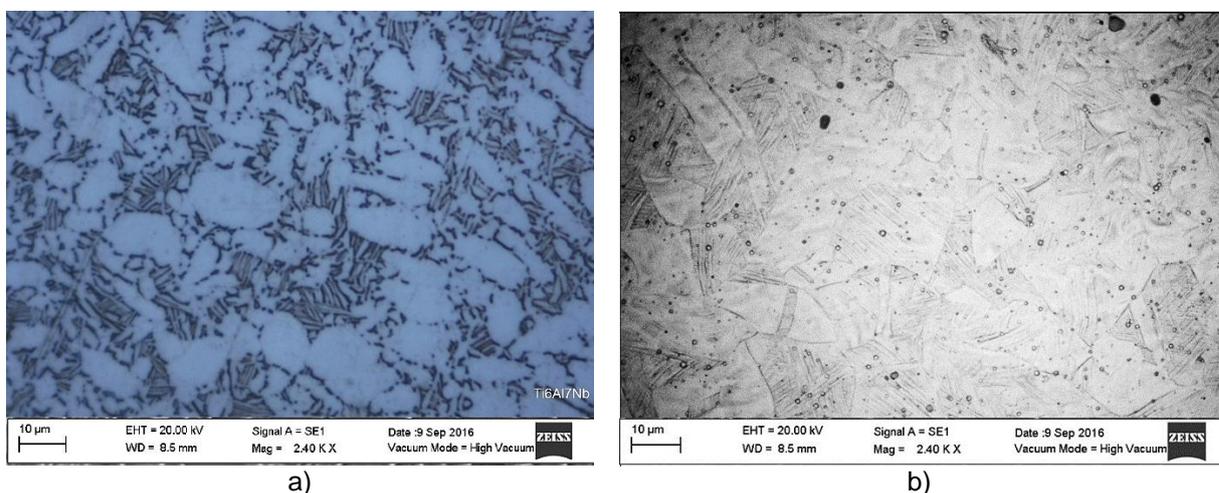


Fig. 1. Probetas de trabajo. a) Aleación Ti-6Al-7Nb. b) Acero AISI 316L. Fuente: autores

La herramienta de corte utilizada fue un inserto redondo BIDEMICS RGN120700E004 JX1 de la familia de las cerámicas (NTK Cutting Tool de Japón), sin recubrimiento, de 12,7 mm de diámetro y 7,94 mm de espesor, especialmente diseñada para el mecanizado de aleaciones termorresistentes, montada en un portainsero Kennametal DRG NR-164D-KC3 NA4 con fijación superior mediante brida y tornillo. A cada herramienta se le realizó una inspección visual del filo con la ayuda del microscopio Olympus SZH, con el fin de verificar su integridad. La dureza se midió en cinco puntos como se muestra en la figura 2 y su valor promedio fue de 94 HRA. En la tabla 1 se muestra la composición química.



Fig. 2. Puntos de medición de dureza en la herramienta. Fuente: autores

Tabla 1. Composición química de la herramienta de corte BIDEMICS JX1. Fuente: autores

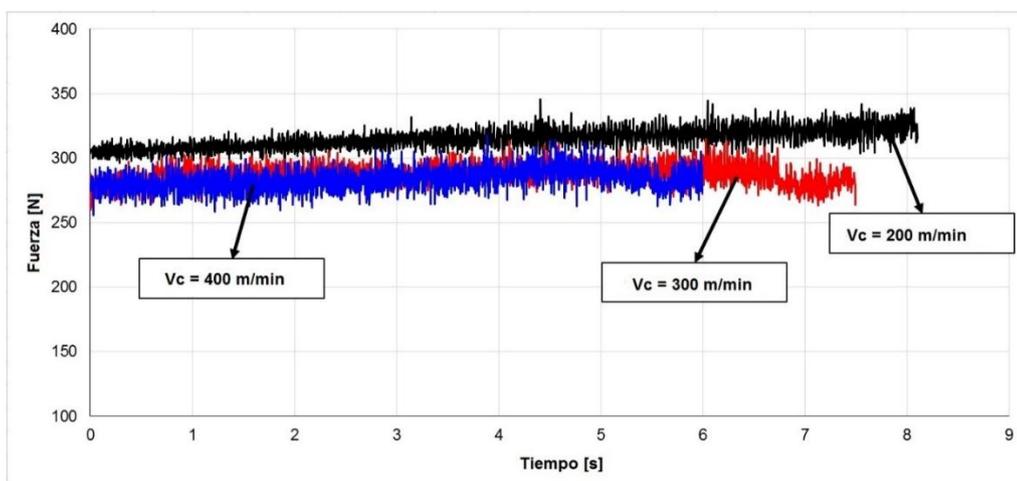
| | Tungsteno | Oxígeno | Aluminio | Carbono | Zirconio |
|----------------------|-----------|---------|----------|---------|----------|
| | % | % | % | % | % |
| Parte externa | 55,23 | 18,78 | 16,12 | 6,4 | 3,45 |
| Parte interna | 56,22 | 17,94 | 17,33 | 4,92 | 3,57 |

La investigación consistió en determinar el comportamiento de la herramienta de corte, desde el punto de vista de las fuerzas de corte al maquinado dos aleaciones diferentes consideradas de mala maquinabilidad (operación de torneado de una aleación de Ti-6Al-7Nb y de un acero AISI 316L). Los parámetros de corte utilizados se determinaron en base a los criterios ofrecidos por el fabricante de la herramienta de corte y a los objetivos de la investigación. Para el caso del maquinado de la aleación de Ti-6Al-7Nb, la velocidad de corte se varió en tres niveles 130 m/min, 200 m/min y 270 m/min, el avance y la profundidad se mantuvieron constantes e igual a 0,2 mm/rev y 1 mm respectivamente. Para el caso del acero AISI 316L se varió la velocidad de corte y el avance en tres niveles; los valores de velocidad de corte fueron 200 m/min, 300 m/min y 400 m/min; el avance 0,1 mm/r, 0,15 mm/r y 0,2 mm/r mientras que la profundidad de corte permaneció constante e igual a 0,5 mm. No se utilizaron lubricantes en el proceso de mecanizado.

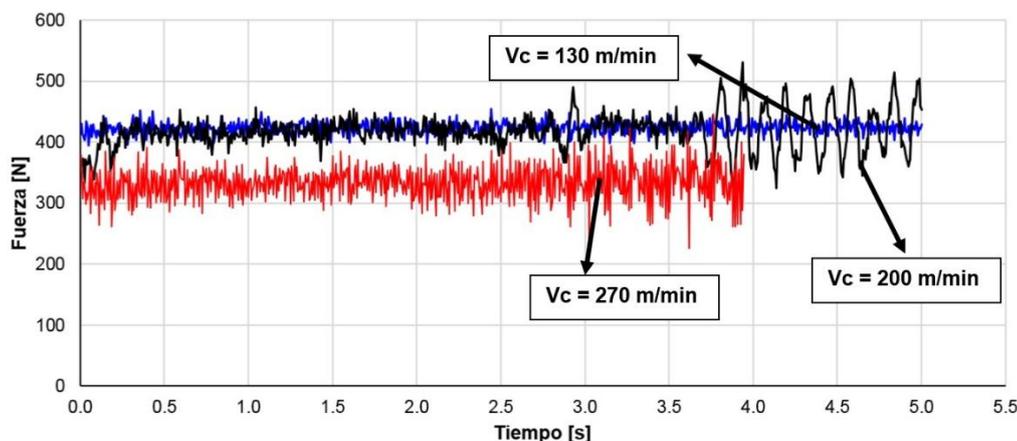
3. Resultados y Discusión

Durante el maquinado del acero AISI 316L se pudo apreciar una estabilidad en el comportamiento de la fuerza de corte en el tiempo, como se aprecia en la figura 7a, para todas las velocidades de corte estudiadas.

Para el caso de la aleación Ti-6Al-7Nb se puede apreciar una estabilidad para la menor velocidad de corte (130 m/min), no siendo así para las otras dos velocidades donde se aprecia una elevada variabilidad en el tiempo, figura 7b, lo cual puede estar provocado por la aparición del fenómeno de *chatter*, si se tiene en cuenta que con la aparición de las fluctuaciones de la fuerza, se observó un deterioro de la rugosidad superficial para las velocidades de 200 m/min y 270 m/min. Los valores de fuerza obtenidos para la velocidad de corte de 200 m/min, son ligeramente superior para el maquinado de la aleación Ti-6Al-7Nb y en la misma se aprecia también una mayor variación en el tiempo, lo cual demuestra que la aleación Ti-6Al-7Nb tiene un peor comportamiento que el acero AISI 316L desde el punto de vista del comportamiento de la fuerza de corte principal.



a)



b)

Fig. 7. Comportamiento de la fuerza de corte en el tiempo. a) maquinado del acero AISI 316L, b) maquinado de la aleación Ti-6Al-7Nb

Conclusiones

Durante el maquinado de la aleación Ti-6Al-7Nb se apreció una variación de la fuerza de corte para las velocidades de 200 m/min y 270 m/min, no siendo así para la velocidad de 130 m/min. En el caso del maquinado del acero AISI 316L, se observó una estabilidad en el patrón de la fuerza para todas las velocidades estudiadas.

Se observó una coincidencia en la aparición de las fluctuaciones de las fuerzas durante el maquinado de la aleación Ti-6Al-7Nb. Para las velocidades de 200 m/min y 270 m/min, se puede asociar a la aparición del fenómeno de *chatter*. Esto se justifica con la aparición del deterioro sufrido en la rugosidad superficial para estos valores de velocidad de corte.

Referencias

1. Tezuka R, Sekiya K, Yamada K, Yamane Y. Evaluation of Adhesion on Tool-Chip Interface with Dynamic Components of Cutting Force. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. 2010;76(8):926-32. DOI 10.2493/jjspe.76.926
2. Manohar M, Jayakumar K, Cherian RM, George KM. Experimental Study on the Machinability of Inconel 718 Alloy Using Coated Carbide Tool. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;787:448-53. DOI 10.4028/www.scientific.net/amm.787.448
3. Tan DW, Guo WM, Wang HJ, Lin HT, Wang CY. Cutting performance and wear mechanism of TiB₂-B₄C ceramic cutting tools in high speed turning of Ti6Al4V alloy. *Ceramics International*. 2018;44(13):15495-502. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.05.209
4. Kesavan J, Senthilkumar V. Experimental investigations on cryo-machining of Hastelloy C-276 with tool wear characteristics. *Sādhanā*. 2020;45(1):1-14. DOI 10.1007/s12046-020-01477-0
5. Parenti P, Puglielli F, Goletti M, Annoni M, Monno M. An experimental investigation on Inconel 718 interrupted cutting with ceramic solid end mills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;117(7-8):2173-84. DOI 10.1007/s00170-021-07148-6
6. Ma Z, Xu X, Huang X, Ming W, An QL, Chen M. Cutting performance and tool wear of SiAlON and TiC-whisker-reinforced Si₃N₄ ceramic tools in side milling Inconel 718. *Ceramics International*. 2021; 48(3): 3096-3108. DOI 10.1016/j.ceramint.2021.10.084
7. Yu W, Ming W, An QL, Chen M. Cutting performance and wear mechanism of honeycomb ceramic tools in interrupted cutting of nickel-based superalloys. *Ceramics International*. 2021; 47(13):18075-18083. DOI 10.1016/j.ceramint.2021.03.123
8. Jadhav PS, Mohanty CP. Comparative analysis of indirect, direct and hybrid cryogenic machining of Nimonic C-263 superalloy. *Journal of Engineering Research*. 2021. DOI 10.36909/jer.11687
9. del Risco-Alfonso R, Pérez-Rodríguez R, Zambrano Robledo PdC, Rivas Santana M, Quiza R. Optimization of the Cutting Regime in the Turning of the AISI 316L Steel for Biomedical Purposes Based on the Initial Progression of Tool Wear. *Metals*. 2021; 11(11): 1698. DOI 10.3390/met11111698.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Ricardo del Risco Alfonso. <https://orcid.org/0000-0002-0225-9281>

Participó en el diseño de la investigación y en la revisión de la investigación bibliográfica. Trabajó en la recolección y el procesamiento de los datos para el estudio. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos y en el análisis de los resultados. Participó en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final.

Roberto Pérez Rodríguez. <https://orcid.org/0000-0001-5741-5168>

Trabajó en el diseño de la investigación, el análisis de los resultados, en la revisión crítica del contenido, en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final.

Marcelino Rivas Santana. <https://orcid.org/0000-0002-0305-515X>

Ayó en la revisión de la investigación bibliográfica, en la recolección de los datos, en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final.

Patricia del Carmen Zambrano Robledo. <https://orcid.org/0000-0002-9491-0069>

Trabajó en el diseño de la investigación, el análisis de los resultados, en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final.