

Predicción dinamométrica del comportamiento de la aleación AA2024 en los procesos de mecanizado en un rango de velocidades moderadas

M.S. CARRILERO, M. MARCOS, M. ÁLVAREZ, M. SÁNCHEZ Y F. GONZÁLEZ

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, Escuela Superior de Ingeniería
C/ Chile s/n 11003-Cádiz

El elevado número de parámetros que rige un proceso de mecanizado por arranque de viruta complica el establecimiento de un criterio, basado en los mismos, que garantice el comportamiento óptimo de una aleación. Por ello, generalmente, se adoptan criterios relacionados con algunos de los parámetros de salida. El criterio mayoritariamente aceptado se basa en el análisis realizado sobre la calidad de acabado superficial. Sin embargo, el estudio de la calidad superficial de piezas mecanizadas exige laboriosos procesos de medida, que conllevan paradas de máquina y, a menudo, extracción de las piezas. En el presente trabajo se propone una alternativa que evita los procesos de medida intermedios. Esta alternativa está basada en la aceptación de la rugosidad como una medida de la calidad superficial de las piezas sometidas a procesos de mecanizado, y en el establecimiento de una correlación entre las fuerzas de corte medidas y la rugosidad superficial de las piezas mecanizadas.

Palabras clave: Fuerzas de corte, rugosidad, mecanizado, AA2024

Dynamometric prediction of the behaviour of AA2024 aluminium alloy in the machining processes with moderate cutting speeds

A cutting process depends on a large number of parameters. Therefore, the establishment of a machinability criterion based on them is complicated. By this reason, criteria related with any output parameters are usually assumed. In this way, surface finished quality is the most extended machinability criterion. Nevertheless, the machined workpiece surface quality analysis involves tough measurement processes with shutdown of machine and, often, extraction of samples. In the present work, an alternative is proposed in order to avoid the intermediate measurement processes. This alternative criterion is based on assuming roughness as surface quality measurement of machined workpieces, and the establishment of a correlation between this parameter and the cutting forces.

Key words: Cutting forces, roughness, machining, AA2024

1. INTRODUCCION

El comportamiento que presenta una aleación metálica en un proceso de mecanizado está asociado al concepto de maquinabilidad. Habitualmente, este concepto se relaciona con la facilidad que presenta una aleación a ser cortada (1). Sin embargo, esta facilidad es, a menudo, difícilmente evaluable debido al elevado número de parámetros como, avance, profundidad de corte, fuerzas de corte, velocidad de corte, material y geometría de la herramienta, etc., los cuales suelen presentar relaciones entre ellos de un alto grado de complejidad. Por tanto, resulta difícil establecer un criterio de maquinabilidad de una aleación que esté basado en los valores de esos parámetros y sus relaciones. Por ello, habitualmente se tiende a adoptar criterios basados en un sólo parámetro, preferiblemente de salida. En lo que se refiere a las aleaciones de aluminio, el criterio más comúnmente empleado se basa en la calidad de acabado superficial de las piezas mecanizadas (2,3). Sin embargo, el seguimiento de la calidad superficial en los distintos tramos de un proceso de corte implica, además de laboriosos procesos de medida, otros factores que pueden producir alteraciones en las

siguientes fases del proceso como son las paradas de máquina o, en la mayoría de los casos, la necesidad de extraer las piezas para efectuar las medidas. En orden a evitar estas dificultades, en el presente trabajo se propone un método de evaluación de la maquinabilidad de la aleación AA2024 (Al-Cu) basado en la relación obtenida entre la componente principal de la fuerza de corte y el parámetro de rugosidad R_a , tomado éste como medida de la calidad superficial.

2. EXPERIMENTAL

El material empleado para nuestro estudio ha sido la aleación de aluminio-cobre AA2024 T-351, en forma de barras cilíndricas de longitud variable entre 300 y 400 mm y diámetro comprendido entre 60 y 90 mm. Su composición nominal en tanto por ciento en peso se recoge en la Tabla I. Dicha aleación es de uso común en la industria aeronáutica y su estudio forma parte de un proyecto conjunto entre nuestro grupo de investigación y Construcciones Aeronáuticas S.A. (C.A.S.A.).

Se realizaron ensayos de torneado de 10 segundos de dura-

TABLA I
COMPOSICIÓN NOMINAL DE LA ALEACIÓN AA2024

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Al
4.00	1.50	0.60	0.50	0.50	0.25	0.15	0.10	Resto

ción en un torno horizontal EmcoTurn-242 T, equipado con Control Numérico Emcotrónico TM02 de 2½ ejes, empleándose para cada ensayo herramientas nuevas ISO KCMW 11T3 08 FN M- de Seco. Con estas dos condiciones fijadas para cada ensayo, corto tiempo de duración y herramienta nueva en cada uno, se pretende evitar problemas colaterales relacionados con la variación de la geometría de la herramienta, como el desgaste de la misma (4) o la formación de filo adherido (5,6). Además, antes de la realización de cada ensayo las piezas fueron sometidas a un proceso inicial de desbaste, con objeto de eliminar las capas procedentes tanto de los procesos previos de fabricación como la natural formada por su exposición al aire. Seguidamente, y como se recomienda en (7,8) las piezas fueron sometidas a un proceso de acabado con objeto de evitar la producción de vibraciones inducidas por la superficie de la pieza sobre la herramienta.

El Control Numérico acoplado al Centro de Torneado permite fijar parámetros como la profundidad de corte, p , y controlar la velocidad de corte, v , y el avance, f . Para la realización de los ensayos se fijó una profundidad de corte de 2 mm, tomándose v entre 43 y 170 m.min⁻¹, para avances comprendidos entre 0.05 y 0.3 mm/rev.

Para la medida de las fuerzas de corte se empleó un dinamómetro piezo eléctrico KISTLER-9121 de tres componentes, especialmente adaptado al revolver de ocho posiciones del Torno CNC, empleándose un portaherramientas 9153A20 para torneado exterior, Figura 1. La adquisición de datos fue efectuada a través de un amplificador KISTLER Multicharge Channel Amplifier 5019A de cuatro canales, conectado a un ordenador compatible IBM PC equipado con una tarjeta CIO-AD16 de adquisición de datos. Los valores de las fuerzas de corte fueron adquiridos y procesados haciendo uso de la versión 2.0 para DOS del programa CUTTING FORCE/TURNING de Kistler.

En la Figura 2 se muestra un diagrama típico Fuerza-Tiempo para un ensayo de torneado, tomado desde el instante en que la herramienta entra en contacto con la pieza. La fuerza de corte resultante, F , puede descomponerse en tres componentes ortogonales denominadas fuerza de avance, F_f , fuerza radial, F_p , y fuerza tangencial, F_c . Obsérvese cómo el valor de F_c es notablemente superior al de las otras dos componentes, por lo que dicha componente recibe el nombre de componente principal de la fuerza de corte y, frecuentemente, su valor se asume como el valor de la fuerza de corte (9). Por otro lado, en la misma figura, pueden distinguirse dos zonas. Una primera, en la que las fuerzas experimentan un fuerte crecimiento en un corto intervalo de tiempo, debido a la transición entre el instante en que la herramienta contacta con el material y el instante en que el sistema herramienta-pieza alcanza un régimen estacionario, correspondiente a la segunda zona. Sin embargo, en este estado estacionario, la fuerza puede presentar fluctuaciones tanto periódicas como aleatorias alrededor de un valor medio. Estas fluctuaciones pueden asociarse a variaciones en los parámetros propios de la pieza que se mecaniza (irregularidades en el diámetro, inhomogeneidades en el material, etc.) o a los parámetros de mecanizado (inestabilidad en el avance o

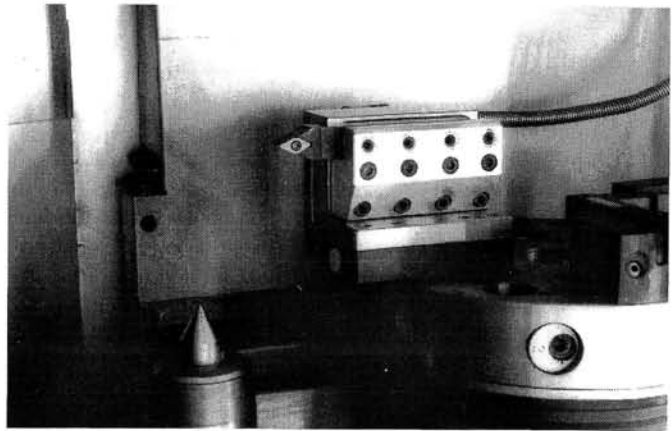


Fig. 1. Dinamómetro piezoeléctrico de tres componentes adaptado al torno CNC.

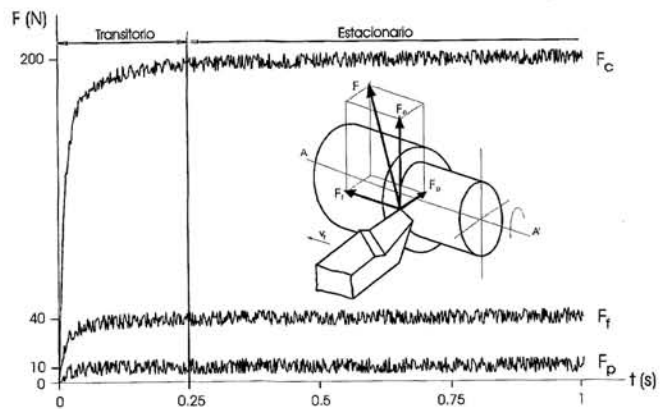


Fig. 2. Diagrama Fuerza-Tiempo en un proceso de torneado.

velocidad, etc.) o a la formación de la viruta (rotura de la viruta, formación de filo adherido, etc.) o a la geometría de la herramienta (10-12). Si el proceso de corte está correctamente diseñado, sólo las dos últimas causas tienen una influencia apreciable sobre las vibraciones experimentadas por las fuerzas de corte. Asumiendo estas causas como irremediables, la componente principal de la fuerza de corte ha sido evaluada como el valor medio en la rama correspondiente al estado estacionario del diagrama Fuerza-Tiempo.

Las medidas de rugosidad se llevaron a cabo en un equipo Perthen, modelo PERTHOMETER C5D, equipado con una unidad de avance de Perthen, modelo PERTHOMETER PRK, empleándose un palpador de 3 µm de radio de punta. Se ha tomado R_a como parámetro indicativo de la calidad de acabado superficial de las piezas mecanizadas (13). Para cada una de las condiciones de corte, se realizaron cuatro medidas de R_a en sendos puntos elegidos al azar. En cada caso, el valor tomado de R_a ha sido el valor medio de los cuatro valores medidos.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 3 se muestra la topografía superficial de una pieza mecanizada a una velocidad de 70 m.min⁻¹ con un avance de 0.3 mm/rev, construida a partir de la adquisición de un

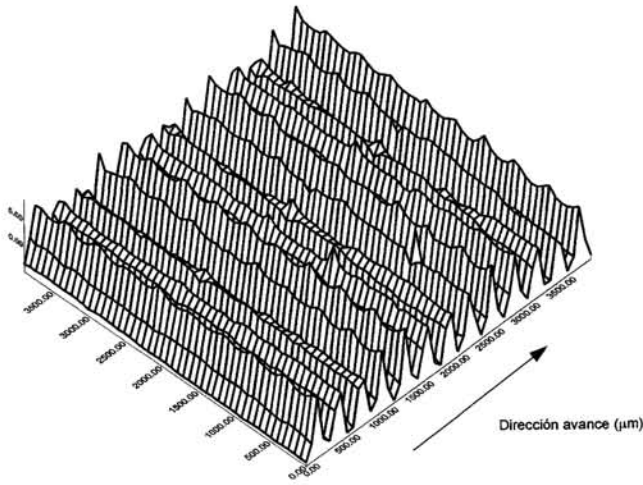


Fig. 3. Topografía superficial de una pieza torneada.

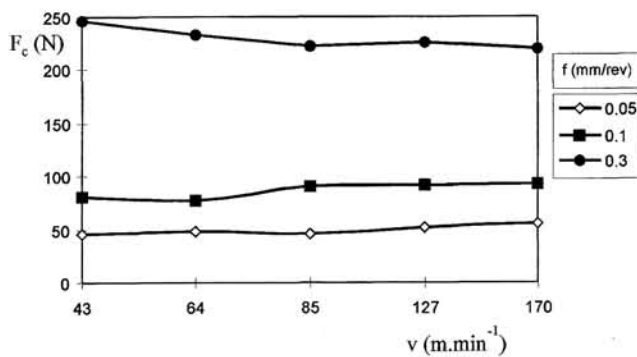


Fig. 4. Evolución de F_c con la velocidad de corte para los distintos avances considerados.

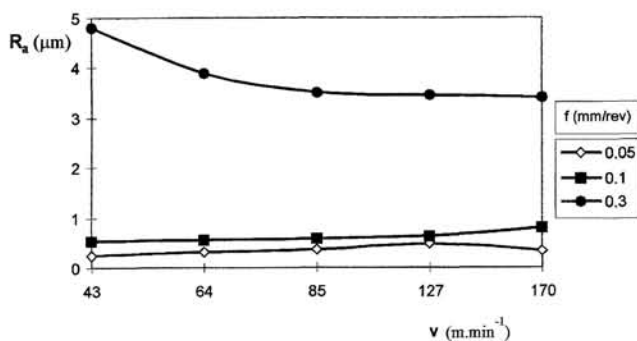


Fig. 5. Evolución de R_a con la velocidad de corte para los distintos avances considerados.

conjunto de perfiles de rugosidad en un área de $4 \times 4 \text{ mm}^2$ de la mencionada pieza. Como puede observarse en dicha figura, existe una rugosidad periódica, que puede ser asociada con el avance, combinada con otra de tipo aleatorio que puede asociarse con los mismos parámetros que las vibraciones de la fuerza de corte. Esto da una primera idea de la posibilidad de establecer correlaciones entre ambas magnitudes.

En la Figura 4 se muestra la evolución, con la velocidad de corte, de la componente principal de la fuerza de corte, F_c , para los distintos avances seleccionados. Según se extrae de la observación de dicha figura, la fuerza de corte apenas si expe-

rimenta variación con la velocidad para los menores avances elegidos, 0.05 y 0.1 mm/rev, pudiéndose ajustar $F_c(v)$ a una recta horizontal. Por otro lado, para el mayor avance tomado, 0.3 mm/rev, la fuerza de corte experimenta un descenso cada vez más atenuado en el rango de velocidades entre 40 y 80 m.min^{-1} , para a partir de ahí, aproximarse asintóticamente a una horizontal, lo que está de acuerdo con (2) en lo que se refiere al mecanizado de aleaciones ligeras.

Por su parte, en la Figura 5 se representa la evolución del parámetro de rugosidad R_a con la velocidad de corte para el mismo rango de avances. Como puede apreciarse en dicha figura para avances de 0.05 y 0.1 mm/rev la rugosidad superficial prácticamente permanece constante. Por tanto, al igual que ocurre con la fuerza de corte, en este rango de avances, es posible ajustar su evolución a una horizontal. Además, la misma figura sugiere un comportamiento para avances superiores, 0.3 mm/rev, semejante al obtenido para la fuerza de corte, esto es, descenso cada vez más atenuado entre 40 y 80 m.min^{-1} , seguido de una tendencia asintótica a la horizontalidad para valores superiores, lo que estaría de acuerdo con lo expuesto en (14) para el mecanizado del aluminio y sus aleaciones. Obsérvese que para este avance, los valores de la rugosidad son de un orden entre 7 y 10 veces más altos que los medidos para avances pequeños, lo cual es lógico a la vista de lo interpretado en la Figura 3. Esto significa que la mayor calidad superficial se logra en el rango marcado por pequeños avances.

4. CONCLUSIONES

Los resultados extraídos de las medidas de rugosidad indican que el mayor grado de maquinabilidad de la aleación AA2024 T-351 para procesos de torneado se consigue en un rango de avances pequeños limitado por el valor 0.1 mm/rev. Los valores de la fuerza de corte medidos en dicho rango son aproximadamente constantes, lo que indica que la potencia consumida viene controlada por la velocidad de corte. Según esto, parecería que, en principio, debería exigirse una velocidad de corte baja. Pero este hecho, dado los valores aconsejables del avance, supondría el efectuar procesos de mecanizado de muy larga duración que, además, conllevan cambios sustanciales en la geometría de la herramienta (15). En consecuencia, en el rango estudiado, las condiciones óptimas de mecanizado quedarían establecidas por bajos avances y altas velocidades de corte.

Por otro lado, la comparación de las Figuras 4 y 5 indica una concordancia entre los comportamientos de la fuerza de corte y la calidad superficial, evaluada a partir de R_a . Esto indica que es posible establecer una predicción de las condiciones óptimas de mecanizado a partir de los datos recogidos en la medida de las fuerzas de corte, evitando de esa forma paradas intermedias en los procesos. No obstante, este hecho debe ser estudiado en mayor profundidad para el caso de ensayos de más larga duración en los que quede notablemente afectada la geometría de la herramienta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por la Consejería de Industria, Comercio y Turismo de la Junta de Andalucía y Construcciones Aeronáuticas S.A. ♦

BIBLIOGRAFÍA

1. E.M. Trent, «Metal Cutting, Butterworths», 1989.
2. G. Boothroyd y W.A. Knight, «Fundamentals of Machining and Machine Tools», Marcel Decker Inc., 1989.
3. R.L. Hastcheck y J. Mayfield, «Machining Aluminum», American Machinist, Special Report 702, p. 1-16, (Marzo 1978).
4. B.T. Chao y G.H. Bisacre, «The Effect of Speed and Feed on the Mechanics of Metal Cutting», Proc. Inst. Mech. Engrs., **165**, p. 1-13, (1951).
5. H.T. Young, P. Mathew y P.L.B. Oxley, «Allowing for Nose Radius Effects in Predicting the Chip Flow Direction and Cutting Forces in Bar Turning», Proc. Inst. Mech. Engrs., **201**(3), p. 213-226, (1987).
6. W.F. Hasting, P. Mathew y P.L.B. Oxley, «A Machining Theory for Predicting Chip Geometry, Cutting Forces from Work Materials Properties and Cutting Conditions», Proc. R. Soc. London, **A371**, p. 569-587, (1980).
7. J.S. Lin y C.I. Weng, «Non Linear Dynamics of the Cutting Process», Int. J. Mech. Sci., **33**(8), p. 645-657, (1991).
8. M.A. Elbestawi, F. Ismail, R. Du y B.C. Ellagaddi, J. Eng. Ind., «Modelling Machining Dynamics Including Damping in the Tool-Workpiece Interface», Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., **116**, p. 435-439, (Nov. 1994).
9. M.S. Carrilero y M. Marcos, «Relaciones Paramétricas en el Mecanizado», Serv. Pub. Universidad de Cádiz, 1994.
10. J.D. Kim, E.B. Lee y D.H. Hyun, «A Study on the Modelling of Tool Motion and High-accuracy Surface Generation by the use of Cutting-Force signals», Jour. Mat. Proc. Tech., **47**, p. 45-62, (1994).
11. J.L. Andreasen y L. De Chiffre, «Automatic Chip-Braking Detection in Turning by Frequency Analysis of Cutting Force», Ann. CIRP, **42**, p. 45-48, (1993)
12. G.M. Zhang y S.G. Kapoor, «Dynamic Generation of Machined Surfaces», Jour. Engrs. Ind., ASME, **113**, Parts 1&2, p. 137-153, (May 1991).
13. American National Standard «Surface Texture: Roughness, Waviness and Lay», ANSI-ASME B46-1-1985, Am. Soc. of Mech. Engrs., 1985.
14. R.S. Hu, P. Mathew, P.L.B. Oxley y H.T. Young, «Allowing for End Cutting Edge Effects in Predicting Forces in Bar Turning with Oblique Machining Conditions», Proc. Inst. Mech Engrs., **200**(2), p. 89-99, (1986).
15. M.S. Carrilero y M. Marcos, «On the Machinability of Aluminium and Aluminium Alloys», J. Mech. Beh. Mat., **7** (3), p. 179-193 (1996)



Libros editados por la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio

Materiales Refractarios y Siderurgia

160 páginas

Precio:

Socio 4.500 ptas.

No socios 6.000 ptas.



I. Experiencias y perspectivas de la utilización de materiales refractarios en la industria siderúrgica.

D. *Ernesto Badía Atucha*, Jefe de obras y refractarios de Altos Hornos de Vizcaya, y D. *Ignacio Larburu Ereño*: Refractarios para hornos altos en AHV.
 D. *Gabino de Lorenzo* y D. *Francisco Egea Molina*: Revestimientos refractarios en horno alto de Ensidesa.
 D. *Jesús María Valerio*, de S.A. Echevarría: Cucharas de tratamiento secundario de acero.
 D. *Jesús Valera*, Ensidesa-Veriña: Evolución de la duración de revestimientos en las acerías de Ensidesa.
 D. *J.A. Pérez Romualdo*, Jefe de colada continua de Altos Hornos del Mediterráneo: Refractarios en cucharas de acero y colada continua de slabs.

II. Investigaciones en el campo de materiales refractarios en el Instituto de Cerámica y Vidrio.

Prof. Dr. *Salvador de Aza*, Director del ICV: El Instituto de Cerámica y Vidrio. Estructura y objetivos.
 D. *Emilio Criado Herrero*: El sector español de refractarios y la industria siderúrgica. Evolución y perspectivas.
 Dr. *Francisco José Valle Fuentes*: Tendencias en el análisis de materiales refractarios.
 Dr. *Serafín Moya Corral*: Materiales cerámicos tenaces basados en mullita-circón.
 Dra. *Pilar Pena Castro*: Materiales refractarios basados en circón.
 D. *Angel Caballero Cuesta*: Evolución de las propiedades refractarias y termomecánicas de las bauxitas.
 Dr. *Rafael Martínez Cáceres*: Cementos refractarios.

■ La reserva de ejemplares y los pedidos deben dirigirse a: **Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**. Ctra. de Valencia, Km. 24,300. 28500 Arganda del Rey (Madrid)