Evaluación de condiciones de maquinado por medio de emisiones infrarrojas

F. Eugenio López G., Miguel A. Ruiz S., Lionel S. Méndez P.*
* Sistemas Integrados de Manufactura, División de Ingeniería Mecánica, FIME-UANL, México.
E-mail: elopez@uanl.mx

Publicado originalmente en: *Ingenierías*, Julio-Septiembre 2002, Vol. V, Número 16, pp. 12-17.
Seleccionado para este número especial de 20 Aniversario de la revista *Ingenierías*.

ABSTRACT

Requirements of high-quality standards have become essential in manufacturing technology. Thus, the conditions of the process must be related with the surface finish achieved. One of those conditions is the thermal energy generated during the machining process. This energy can be measured in terms of temperature increments and depends of the feed, depth of cut and tool cutting speed. As a complement for the series of experiments exposed in the preceding articles this work presents the theoretical fundamentals and experiments based in the effects of tool feed on the temperature behavior during the machining process.

KEYWORDS: thermal energy, cutting speed, tool feed.

INTRODUCCIÓN

En los procesos actuales de manufactura se requiere de acabados precisos, de características superficiales específicas y de tolerancias cada vez menores para las piezas maquinadas. Son varios los factores que intervienen en estos procesos que están relacionados con las características finales de la pieza. Uno de estos factores es la temperatura generada. Como complemento de los experimentos y conclusiones presentadas en los artículos anteriores sobre la trayectoria de herramienta[1] y el espesor de viruta,[2] el presente trabajo se enfoca en el comportamiento de la energía térmica generada durante el fresado, proponiendo un método que relaciona el avance de la herramienta con la temperatura registrada durante la remoción de material.

Es deseable conocer el comportamiento de la temperatura durante el maquinado para asociarla con las probables características de acabado superficial de la pieza, ya que las altas temperaturas ocasionan alteraciones de la superficie.[1] Además, a través de la temperatura se pueden inferir los límites de uso y vida útil de la herramienta de corte.

A lo largo del proceso de maquinado, aproximadamente el 98% de la energía utilizada se transforma en energía térmica,[3, 4] el resto es absorbido por el material de trabajo en forma de deformación plástica.

El conocer los niveles de energía térmica permite seleccionar adecuadamente los materiales y las herramientas para diferentes tipos de trabajos. Esta energía puede ser determinada con base a los cambios de temperatura medidos (figura 1) en un punto de referencia determinado.

Fig. 1. Medidor de emisión infrarroja acoplado en la máquina-herramienta.

OBJETIVOS

Los objetivos que este trabajo pretende alcanzar son:

a) Establecer una relación entre la temperatura registrada en el proceso y el avance fijado para la herramienta de corte.

b) Predecir el comportamiento de los cambios de temperatura para diferentes avances por medio de un modelo validado experimentalmente.

c) Establecer las bases para determinar posteriormente la relación entre la temperatura registrada y la calidad superficial del material así como los parámetros óptimos de maquinado.

MARCO TEÓRICO

A la capacidad de un cuerpo de emitir energía radiante se le conoce como emisividad. A un cuerpo con emisividad igual a uno se le conoce como cuerpo negro. A la capacidad de un cuerpo real de emitir energía respecto al cuerpo negro se le conoce como emitancia. Esta propiedad difiere en cada cuerpo y depende de la estructura y características del mismo.

$$\varepsilon = \frac{J_r}{J_{cn}} \tag{1}$$

donde:

ε: Emitancia.

J_r: Densidad de flujo radiante del material.

J_{cn}: Densidad de flujo radiante del cuerpo negro.

La ley de Stefan-Boltzman[5] propone el cálculo de la cantidad de radiación emitida en todas direcciones y sobre todas las longitudes de onda simplemente a partir del conocimiento de la temperatura de un cuerpo utilizando su emitancia ε y la constante σ denominada "constante de Stefan-Boltzman".

$$P(T) = \varepsilon \sigma T^4 \tag{2}$$

donde:

P: Potencia emisiva de la superficie en W/m^2.

T: Temperatura de la superficie del cuerpo en K.

ε: Emitancia del material.

$$\sigma = 5.67010^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \tag{3}$$

Conociendo el rango de temperaturas a las que se somete un material, es posible graficar el comportamiento de su potencia emisiva. En la figura 2 se representa este comportamiento para el caso del aluminio puro, el cual tiene una emitancia[6] de 0.25.

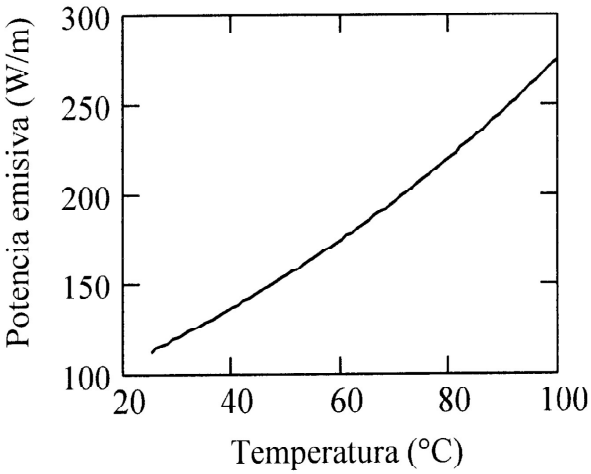

Fig. 2. Potencia emisiva del aluminio puro a temperaturas de emisión entre 25 y 100 °C.

Así, despejando de (2) y con la conversión adecuada de la cantidad de radiación puede conocerse la temperatura a la cual se emite esa energía.

Debido a que la zona del espectro infrarrojo abarca un amplio rango de longitudes de onda de la radiación

térmica (desde los 0.78 mm hasta los 500 mm), es de gran utilidad para el registro de energía térmica emitida en cualquier material, ya que la radiación de ondas aumenta con la temperatura.

Las siguientes condiciones se consideran en la experimentación para relacionar la potencia emisiva espectral[7] con la temperatura:

1. La radiación emitida varía en forma continua con la longitud de onda.
2. En cualquier longitud de onda la magnitud de la radiación emitida aumenta con la temperatura.
3. La región espectral en la que la radiación se concentra depende de la temperatura.
4. Para temperaturas menores o iguales a 527°C, la emisión se encuentra de manera predominante en la región infrarroja del espectro y no es visible para el ojo humano.

La fórmula (4) desarrollada por Cook[9] puede ser utilizada para predecir el incremento de temperatura de la interfase herramienta-viruta durante el proceso de maquinado. Se deriva del análisis dimensional y de datos experimentales de torneado de diferentes materiales para establecer los valores constantes de la ecuación:

$$\Delta T(Vc) = \frac{0.4U}{\rho c}\left((Vc \cdot \frac{h}{\alpha}\right)^{0.33} \qquad (4)$$

donde:

ΔT: Incremento de temperatura en la interfase en °C.

Vc: Velocidad de corte en m/s.

U: Energía específica de remoción de material en N- m/mm^3.

ρ: Densidad del material en gm/cm^3.

C: Calor específico en J/kg-°C.

α: Difusividad térmica en m^2/s.

h: Espesor de viruta en mm.

Al incremento de temperatura obtenido por esta ecuación debe sumarse la temperatura de referencia, considerada en este experimento como la temperatura ambiente a 25°C.

$$T(Vc) = \Delta T(Vc) + T_{\text{Referencia}} \qquad (5)$$

donde:

T: Temperatura media del proceso.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las mediciones se efectuaron en las instalaciones del Centro de Manufactura Integrada por Computadora y del Programa Doctoral de Materiales de la FIME UANL. Se utilizaron los siguientes equipos:

· Centro de Maquinado EMCO VMC 300.

· Termómetro de Emisiones Infrarrojas Raytek modelo Raygner MX4.

Considerando las condiciones experimentales de potencia emisiva mencionadas en el marco teórico, se utilizó un espectrómetro infrarrojo para el registro de la temperatura, el cual se colocó dentro del centro de maquinado en la posición más cercana a la zona de remoción para obtener una captación completa de las ondas emitidas por el material (figura 1). Los datos registrados por el espectrómetro se almacenaron en archivos de computadora y se procesaron con software Raytek Graphic.

El material usado en los ensayos fue un perfil extruído de aluminio comercial para maquinado. El análisis electroquímico identificó el material como aluminio 6063 de acuerdo a las tablas del Manual de Aluminios de la ASM. Los resultados de las pruebas de tensión revelan que el material es una aleación de aluminio 6063 con tratamiento térmico clase T6 ó T8.

CONDICIONES DE MAQUINADO

Para los ensayos se maquinó la barra de aluminio con condiciones de corte fijas utilizando un programa de CNC (figura 3) en el centro de maquinado EMCO VMC 300.

G 55	Origen del usuario
R_1=12.5	Plano de referencia
T3 D3 L96	Cambio de herramienta
M03 S1500 F13	Giro del husillo, velocidad y avance
G53 G00 Z200	Movimiento en coordenadas absolutas
G00 X -10 Y -21	Posición inicial
G00 Z=R1 21	Acercamiento
G01 Z=R1-2.54	Profundidad de corte
G01 X60	Movimiento de corte
G53 G00 Z200	Retiro de herramienta
G55 G00 X300	Movimiento de mesa
M30	Fin de programa

Fig. 3.- Programa de CNC para el maquinado utilizado en la experimentación.

El corte se hizo a 2.54 mm (0.1 in). No se utilizó refrigerante. El resto de los valores de corte experimentales se muestran en la tabla I. Se realizaron cinco ensayos a diferentes velocidades de corte, las cuales se muestran en la tabla II.

Tabla I. Valores de corte utilizados en los ensayos.		
Número de álabes	N	2
Radio de la herramienta (mm)	r	8
Velocidad de giro (rpm)	S	1500
Profundidad de corte (mm)	t	2.54

Tabla II. Velocidades de corte para ensayo.					
Ensayos	1	2	3	4	5
Velocidad de corte (mm/min)	10	50	70	90	120

RESULTADOS OBTENIDOS

Después de procesar los datos registrados y ajustarlos a curvas, se obtiene el comportamiento característico de temperatura de cada ensayo, los cuales se muestran en la figura 4. Este ajuste corresponde a una ecuación exponencial de la forma:

$$T(t) = k \cdot t^n \tag{6}$$

donde:

T: Temperatura del proceso.

t: Número de muestreos.

k: Coeficiente del ensayo.

n: Exponente del ensayo.

Ajustando a una curva conveniente los valores de temperatura en el punto terminal de cada ensayo, se obtiene una ecuación experimental (5). Esta ecuación de tipo exponencial coincide con las conclusiones obtenidas por Trigger[8] en su trabajo referido al comportamiento de la temperatura.

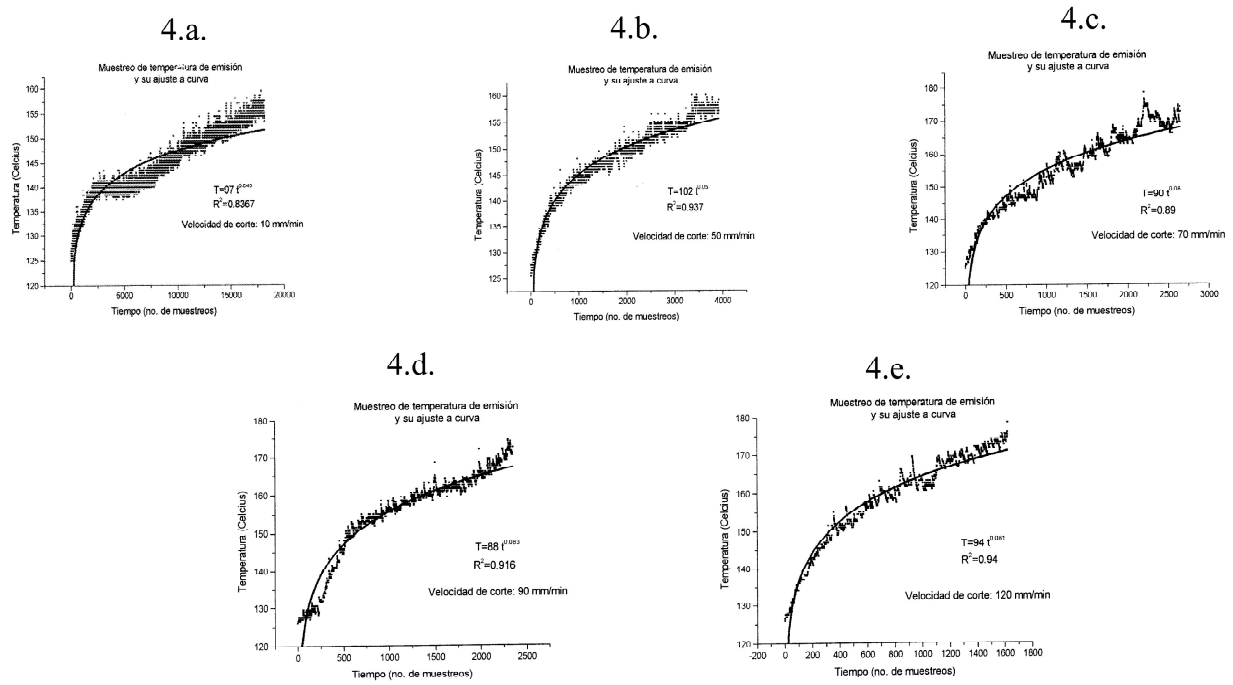

Fig. 4. Gráficas del comportamiento de la temperatura en los 5 ensayos realizados.

$$T_{Al6063}(Vc) = 107 \cdot Vc^{0.086} \quad (7)$$

La ecuación (7) es característica de la temperatura del proceso para la muestra de material Al6063.

Sustituyendo en (4) y (5) las propiedades térmicas correspondientes y la densidad de la aleación Al6063 para espesor de viruta de 1 mm y energía específica de:

$$U = 0.56 N \frac{m}{mm^3} \quad (8)$$

se obtiene el comportamiento teórico de la temperatura de la aleación Al6063 para cualquier valor de velocidad de corte.

Las ecuaciones (5) y (7) pueden compararse para obtener una referencia del comportamiento teórico y experimental de la temperatura en el proceso de maquinado (figura 5).

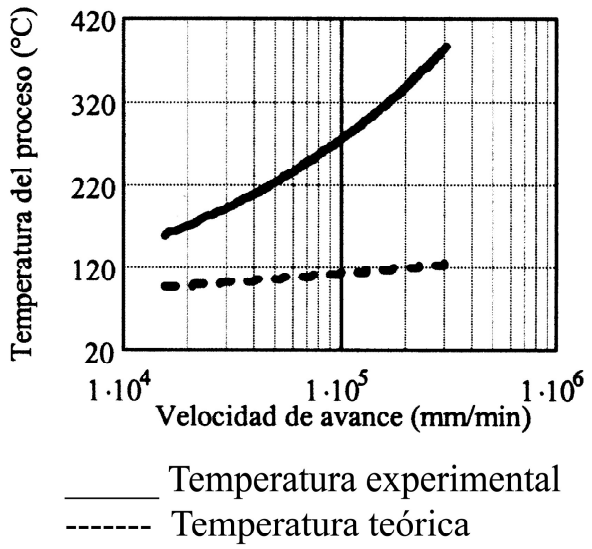

Fig. 5. Comparación de las temperaturas de acuerdo a la ecuación de Cook y la obtenida experimentalmente.

CONCLUSIONES

La temperatura generada durante el maquinado permite evaluar condiciones determinantes del proceso. La interpretación del comportamiento implica que:

1. La temperatura tiende a alcanzar un estado de estabilidad.
2. La temperatura del proceso se incrementa al incrementarse la velocidad de corte.
3. Existe una relación del comportamiento de la temperatura entre cada ensayo.
4. Algunas variables determinantes del proceso pueden calcularse con la metodología mostrada.
5. El análisis mostrado sobre la relación temperatura-velocidad de avance es similar a trabajos publicados referidos al tema y muestra los mismos resultados.

La metodología presenta la ventaja de ser fácilmente implementable en un laboratorio, pero no lo es en un tren productivo.

MEJORAS A DESARROLLAR

Se propone la comprobación de los valores de emitancia de los materiales involucrados.

Se recomienda repetir la experimentación bajo otros criterios que permitan evaluar las condiciones de maquinado para diferentes materiales y/o herramientas de corte.

Como complemento es deseable realizar un registro de la rugosidad superficial de la pieza en cada ensayo para buscar una relación entre la temperatura del proceso y la calidad superficial de la pieza maquinada.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado por los autores como parte de su proyecto de investigación en el Doctorado de Materiales FIME-UANL bajo el apoyo de PROMEP, PAICYT 2001 (contrato CA556-01) y CONACYT (clave 37668-U).

Los autores agradecen la colaboración del ingeniero José Luis Castillo Ocañas y la Dra. Patricia Zambrano de la Coordinación de Automatización así como al Dr. Alan Castillo y al Dr. Juan Antonio Aguilar Garib del programa doctoral de materiales de la FIME.

REFERENCIAS

1. López, E., Ruiz, M.A., Colás, R., "Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado 1ª

Parte", Ingenierías, Vol. IV, No. 13, pp. 40-47, Diciembre 2001.

2. López, E., Ruiz, M.A., "Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado 2ª Parte", Ingenierías, Vol. V, No. 14, pp. 36-41, Marzo 2002.
3. Metals Handbook, 9th edition, Vol. 16 "Machining", ASM International, 1989.
4. Groover, Mikell P., "Fundamen-tals of Modern Manufacturing", Ed. Pretince-Hall, 1996.
5. Incropera, F., DeWitt, David P., "Fundamentos de Transferencia de Calor", 9a. Edición, Ed. McGraw-Hill, 1999.
6. John E. Hatch, "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", ASM, 1984.
7. Planck, M., "The Theory of Heat Radiation", Dover Publications, Nueva York, 1959.
8. Trigger, K.J., "Progress Report No.2 on Tool-Chip Interface Temperatures", ASME Transac-tions, Vol. 71, No. 2, pp. 163-174, Febrero1949.
9. Cook, N., "Tool Wear and Tool Life", ASME Transactions, J. Engrg. for Industry, Vol. 95, pp. 931-938, Noviembre 1973.