LA OPTIMIZACION DE LAS CONDICIONES DE CORTE

IGNACIO A. HENAO

RESUMEN

Toda operación industrial de remoción de material tiene como fin producir una ganancia para la empresa. En última instancia, el objetivo del análisis de herramientas y de los parámetros de corte es la determinación de las condiciones óptimas de corte que:

- Minimicen los costos de producción por pieza.
- Maximicen la rata de producción en la unidad de tiempo.
- Maximicen las utilidades.

Cualquier economía en maquinado o en la selección de la herramienta tendrá un efecto positivo en estas metas. Por lo tanto, todo esfuerzo hecho en la optimización de estos factores redundará en beneficio de la empresa.

INTRODUCCION

Una tarea importante de la dirección moderna de la empresa metal-mecánica es la determinación de condiciones óptimas de corte, que permitan minimizar los costos de manufactura o los tiempos de proceso. La estructura matemática de las ecuaciones de duración hace de ellas una herramienta interesante para la determinación de los parámetros de corte, ya que el comportamiento de desgaste del par pieza-herramienta influye notoriamente en la ubicación del valor óptimo. Por otra parte, la representación por medio de fórmulas del comportamiento de desgaste calculado empíricamente, sólo es posible en forma aproximada.

El tema se ha investigado bastante, y en la literatura se han dado a conocer varias ecuaciones de duración, que, con base en su estructura matemática, tienen diferentes capacidades de representación del comportamiento de desgaste y por lo tanto difieren en cuanto a su efectividad de optimización. En este breve artículo se trata de mostrar las ecuaciones más representativas, conocidas por el autor, y de exponer algunas consideraciones en cuanto a su utilidad desde un punto de vista práctico.

IGNACIO A. HENAO. Ingeniero Químico de la Universidad de Antioquia, especialista en procesos de manufactura de la Rheinish-Westfälische Technische Hochschule Aachen en Alemania, profesor de tiempo completo en el área de procesos y máquinas de la Universidad EAFIT.

Una tarea importante de la dirección moderna de la empresa metal-mecánica es la determinación de condiciones óptimas de corte, que permitan minimizar los costos de manufactura o los tiempos de proceso.

1. LAS ECUACIONES DE DURACION

En la tabla siguiente se muestran las ecuaciones de duración más importantes que han aparecido en la literatura técnica, desde que hizo su aparición la que parece haber sido la primera, en el ya clásico trabajo "On the Art of Cutting Metals", publicado por F.W. Taylor en 1907. En todas ellas **T** representa la duración del filo, **v** la velocidad de corte, **a** la profundidad de corte y **s** el avance. Las constantes o los exponentes de las ecuaciones dependen básicamente de los siguientes factores:

- El material de la pieza
- El material de la herramienta
- La geometría del filo o la cuña de corte (excepto en la ecuación No. 5).
- El criterio de desgaste adoptado (excepto en la ecuación No. 9).
- El rango de condiciones de corte.

Sin embargo, está fuera de la intención de este artículo la explicación detallada de las ecuaciones y

No.	AUTOR	ECUACION
1	Taylor (1907)	$v \,.\, T^n = C_T$
2	Woxen (1932)	$v = \left(\frac{T'}{T}\right)^n . c(q+q_0)$
3	Gilbert (1950)	$v.T^n = \frac{c}{s^e . a^f}$
4	Kronenberg (1954)	$v = \left(\frac{T'}{T}\right)^n . c \frac{(a/s)^k}{(s.a)^l}$
5	Colding (1960)	$k + ax + bx^2 + cy + dy^2 - z - ez^2 + fxy + gyz + hxz = 0$
6	Matthijsen (1965)	$v\,(e + T) = c$
7	Kronenberg (1968)	$(v + k) \,.\, T^n = c$
8	N.N. (1968)	$T = T_0 . e^{k_1} \left(1 - \sqrt{1 - k_2 . \ln \frac{v}{v_0}}\right)$
9	Kirsch (1969)	$v.T^n = s^{-e} . a^{-f} . VK^h . c$
10	König/Depiereux	$T = e^{\left(-\frac{K_v}{m} . v^m - \frac{l_s}{n} . s^n + c\right)}$

sólo se pretende mostrar el interés que ha despertado siempre el tema y la tendencia manifiesta a una complejidad creciente en las ecuaciones:

2. PANORAMA GENERAL

El gran número de parámetros que tienen influencia en el fenómeno ha impedido hasta ahora obtener una ecuación que describa completamente el comportamiento empírico de desgaste de un par pieza-herramienta. Las ecuaciones de duración conocidas representan modelos básicos, que pueden describir matemáticamente, aunque en forma aproximada, el comportamiento de desgaste obtenido en forma experimental. En consecuencia, la exactitud de una ecuación de duración depende de la aproximación con que el modelo describa el comportamiento experimental. El rango de validez de la ecuación dependerá del volumen de información incluida, estimada con el tipo y número de variables tales como velocidad de corte, avance, profundidad de corte y sus relaciones funcionales.

Clasificación de las ecuaciones de duración

Desde el punto de vista de su estructura matemática, es posible clasificar las diez ecuaciones de la tabla en cuatro grupos de complejidad creciente:

A. Las que pretenden describir la curva de duración por medio de una recta. En este grupo encontramos las ecuaciones 1 y 2.

B. Aquellas donde se pretende describir la curva de duración por medio de una parábola o una hipérbola. A este grupo pertenecen las ecuaciones 6, 7 y 8.

C. Descripción, no ya de una curva de duración sino de un campo de duración por medio de una familia de rectas paralelas que incluyen el comportamiento de un tercer parámetro. Esto se observa en las ecuaciones 3, 4 y 9.

D. El mismo caso anterior, pero el comportamiento de duración se describe, ya no con rectas sino por medio de ecuaciones de orden más elevado. Ecuaciones 5 y 10.

Las ecuaciones del tipo D son las que involucran el mayor contenido de información. La ecuación 10 es un caso especial, ya que con esta función se puede describir cualquiera de los cuatro tipos enumerados.

3. DETERMINACION DE LAS CONDICIONES DE CORTE OPTIMAS

Las fórmulas para determinar la duración óptima del filo, la velocidad de corte óptima o el avance óptimo, se obtienen la ecuación de costo o la de tiempo de manufactura, en combinación con una ecuación de duración.

El uso de las ecuaciones de tipo A para la determinación de las condiciones óptimas de corte permite obtener sólo la velocidad de corte o la duración, óptimas para un avance predeterminado. También es de notarse que el ajuste de la curva de duración por medio de una recta, hace que su validez sea sólo para un rango estrecho de velocidades por la pendiente cada vez más negativa de la curva.

Las ecuaciones del tipo B abarcan un mayor rango de velocidades, pero, por su naturaleza trascendental, su solución implica usualmente el empleo de métodos numéricos.

En contraste con la ecuación de Taylor (tipo A), las ecuaciones del tipo C, además de la velocidad de corte, también consideran la influencia que tiene el avance sobre la duración del filo. No obstante, la derivación de las ecuaciones de costos o tiempos de manufactura, en combinación con estas ecuaciones sólo permite obtener soluciones parciales. Sólo se obtienen valores óptimos para el avance y la velocidad de corte manteniendo constante una de ellas. Esto se debe a que estas ecuaciones suponen que sus exponentes son constantes, cuando realmente son variables dependientes de la velocidad de corte y el avance.

Las ecuaciones del tipo D consideran todas las interrelaciones de las variables y permiten, en esta forma, la optimización simultánea de la velocidad de corte y el avance. Sinembargo, su complejidad hace que la determinación de valores óptimos requiera la utilización de procedimientos iterativos, que sinembargo, se pueden agilizar considerablemente por métodos gráficos.

4. EVALUACION DE LAS ECUACIONES DE DURACION

Como ya posiblemente se hizo obvio, la disparidad de criterios aplicable, hace que no tenga mucho sentido una catalogación cualitativa de las ecuaciones discutidas.

Cuando se utiliza la ecuación tradicional de Taylor, en asocio de las ecuaciones de costo o de tiempo de manufactura, se dispone de una ecuación simple que permite la obtención de valores aproximados para la duración del filo:

$$T_0 = \left(\frac{1}{n} - 1\right)\left(\frac{\text{Tiempo para cambio}}{\text{de herramienta}} + b.\frac{\text{Costo de herramienta}}{\text{Costo de salario y máq.}}\right)$$

Con **b = 1,** para la obtención de costos mínimos de manufactura, y **b = 0,** para los tiempos mínimos de manufactura. Dado que el factor **n** de la ecuación de Taylor fluctúa en un estrecho rango de valores ($0{,}1 < n < 0{,}5$), esta ecuación ofrece un medio rápido y práctico para estimar en la práctica los valores óptimos en forma aproximada. Sinembargo, debe tenerse en cuenta que la ecuación tiene validez sólo en aquellos casos en que sea posible el maquinado en una pasada con una sola herramienta.

La derivación de una ecuación similar, incorporando una ecuación de duración que describa una curva (tipo B) o una familia de curvas (tipo D), se hace imposible por la compleja estructura matemática de estas ecuaciones. A modo de ejemplo, para la ecuación 10 resultan dos sistemas de ecuaciones trascendentales que hacen que el cálculo manual de la duración óptima sólo sea posible cuando las condiciones de corte óptimas sean ya conocidas.

En conclusión, a pesar de sus limitaciones, la ecuación de Taylor sigue manteniendo su lugar en la práctica del maquinado, por su estructura simple y general.

Sólo la acumulación de datos empíricos de corte y el uso de sistemas computarizados permitirán la implementación práctica de modelos de optimización con alto contenido de información.

5. ¿QUIEN FUE TAYLOR?

Frederick Winslow Taylor (1856-1915) fue un ingeniero norteamericano, nacido en Germantown, Pennsylvania. Dedicado a las operaciones industriales de maquinado, desarrolló una serie de cuidadosos experimentos que lo llevaron a dos importantes avances: En el campo de la ingeniería, desarrolló con Mounsel White un nuevo método para templar el acero para herramientas que permitió operaciones de arranque de viruta con altas velocidades; en el campo administrativo desarrolló el sistema de administración de planta, conocido más tarde con el nombre de Administración Científica. Como parte de sus trabajos experimentó en forma extensa sobre el desgaste de los materiales utilizados entonces para el corte de metales.

BIBLIOGRAFIA

Colding, B. Machinability of Metals and Machining Costs. International Journal of Machine Tool Design Research. Vol. 1 (1961), No. 3, pp. 220-48.

Essel, K.; Hänsel, W. Analyse der bekannten Standzeitgleichungen. Investigación del WZL RWTH Aquisgrán, 1972.

Gilbert, W.W. Economics of Machining, American Society for Metals, 1950.

Hirsch, B. Ein System zur Ermittlung von Zerspanungsvorgabewerten ins besondere bei rechnergestützter Programierung von numerisch gesteuerten Drehmaschinen. Tesis doctoral RWTH Aquisgrán, 1969.

Köning, W.; Depiereux, W.R. Wie lassen sich Vorschub und Schnittgeschwindigkeit optimieren? Industrie-Anzeiger 91 (1969), No. 61, pp. 1481-84.

Kronenberg, M. Grundzüge der Zerspanungslehre. Berlin, Berlin, Heidelberg, New-York, Springer, 1954.

Kronenberg, M. Replacing the Taylor Formula for a New Tool Life Equation. International Journal of Machine Tool Design Research. Vol. 10 (1970), pp. 193-202.

Matthijsen, M.J.C. The Economic Aspects of High Cutting Speeds and Short Tool Lifes. Annals of the CIRP Vol. XIII, pp. 31-38.

N.N. en Research, January, 1968.

Ravignani, G.L. Graphisches Verfahren zur Ermittlung Optimaler Schnittbedingungen. Industrie-Anzeiger 93 (1971), No. 15, pp. 310-313.

Taylor, F.W. On the Art of Cutting Metals. Transactions ASME 28, 1907.

Woxen, R. A Theory and an Equation for the Life of Lathe Tools. Ingeniorsvetenskapsakademien, Handlingar 119, Stockolm, 1932.