

UN MÉTODO DE MONITOREO DEL DESGASTE DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE BASADO EN UN SENSOR DE PROXIMIDAD DE FIBRA ÓPTICA

A METHOD FOR CUTTING TOOL WEAR MONITORING BASED ON AN OPTICAL FIBER PROXIMITY PROBE

G. de Anda-Rodríguez¹ E. Castillo-Castañeda²

Recibido el 12 de octubre de 2005, aceptado el 24 de mayo de 2006

Received: October 12, 2005 Accepted: May 24, 2006

RESUMEN

Este documento presenta una técnica novedosa para el monitoreo en línea del desgaste de una herramienta de fresado. El desgaste es estimado directamente a partir de un sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO) con características de alta resolución y alto ancho de banda. El SPFO proporciona una medida de la distancia entre su extremo y el perfil de la herramienta. La principal contribución de este trabajo es la aplicación del SPFO para monitorear en línea el desgaste de una herramienta de fresado. Puesto que la luz emitida por el SPFO proviene de un fotodiodo, esta no produce daño a los ojos, lo que la hace más segura que los sensores de desplazamiento de tipo láser. Esta técnica permite monitorear el desgaste de la herramienta en tiempo real, mientras la herramienta gira, con una precisión inferior a 1 micra. Se presentan resultados experimentales para una herramienta de fresado vertical de cuatro filos que gira a 300 rpm.

Palabras clave: Inspección óptica, detección de desgaste, monitoreo de herramientas, sensores de fibra óptica.

ABSTRACT

A novel technique for on-line wear monitoring of a milling tool is presented. The tool wear is estimated directly from a fiber optic proximity sensor (FOPS) with high resolution and high bandwidth characteristics. The FOPS provides a distance measurement between its probe and the tool profile. The main contribution of this work is the application of FOPS to sense on-line the wear of a milling tool. Since the light emitted by this sensor comes from a photodiode, it does not produce eye damage; this is safer than laser displacement sensors. This technique senses the tool wear in real time, while the tool is rotating, with an accuracy of less than 1 micron. Experimental results are also presented for a four-flank cutting tool rotating at 300 rpm.

Keywords: Optic inspection, wear detection, monitoring tools, fiber optic sensors.

INTRODUCCIÓN

Durante los procesos de maquinado tales como torneado o fresado, donde el material es removido, el desgaste de las herramientas de corte reduce considerablemente la calidad de la pieza de trabajo. A pesar de la tecnología actual para estimar el desgaste de las herramientas de corte, la industria manufacturera aún usa métodos principalmente empíricos para evaluar la vida de la herramienta, es decir, el número de horas de maquinado. La figura 1 muestra el clásico proceso de maquinado

usando una herramienta de corte de cuatro filos. La alimentación de la pieza de trabajo es generada por el movimiento lineal de la mesa actuada por un tornillo de bolas y un servomotor de CC; el giro de la herramienta es generado por el movimiento rotacional del husillo, producido normalmente por un motor de CA controlado en velocidad. La velocidad de giro de la herramienta y la velocidad de alimentación de la pieza dependen del tipo de material a maquinar y de la profundidad del corte. Se puede observar en la figura 1 que, para un instante dado, solamente un filo está en contacto con el material.

¹ Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, México Av. Tecnológico s/n S. de G. S., San Luis Potosí, E-mail: memodeanda@yahoo.com.mx

² Universidad Autónoma de Querétaro, México Centro Universitario, 76010 Querétaro México E-mail: ecast@uaq.mx

Si el filo en contacto está desgastado, el siguiente filo debería remover el material excedente del previo, en este momento la fuerza de corte se incrementa. Debido a este hecho, una técnica natural para detectar el desgaste de la herramienta fue utilizando un sensor de fuerza sobre la mesa de trabajo.

Desde hace muchos años, en gran parte de las industrias manufactureras, la vida de una herramienta de corte ha sido estimada como el número de horas de maquinado. Cuando este número empírico expira, la herramienta tiene que ser removida, aunque todavía esté en buenas condiciones. Evidentemente, este método empírico es adecuado solamente cuando la herramienta es usada en exactamente las mismas condiciones de corte durante toda su vida y el material de la pieza de trabajo es suficientemente homogéneo para asegurar un desgaste similar para un tiempo de maquinado similar. En muy pocos casos el desgaste de la herramienta es verificado por métodos fuera de línea mediante inspección visual humana para decidir si está todavía en buenas condiciones de corte. En cualquier caso, la mejor manera de asegurar la calidad de un maquinado final es garantizar que el desgaste de la herramienta permanece dentro de un rango predefinido; si este rango es sobrepasado, la herramienta deberá ser cambiada inmediatamente por una nueva. La figura 2 muestra la geometría de la herramienta para operaciones de fresado vertical considerada en este trabajo.

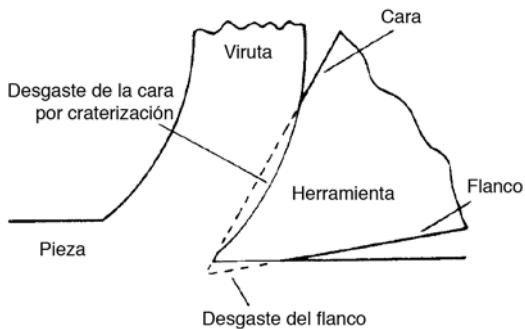


Figura 1. Proceso de corte.



Figura 2. Geometría de una herramienta de corte.

Algunas técnicas han sido desarrolladas para el monitoreo en línea en la detección del desgaste o del rompimiento de una herramienta de corte [1]. El método más común es el monitoreo de la corriente de motor

que acciona el husillo principal. Como se mencionó anteriormente, cuando un filo de la herramienta de corte está desgastado, el siguiente filo debe remover el material excedente, entonces la fuerza de corte se incrementa, produciendo un incremento en la corriente del motor del husillo. Cuando la corriente excede un valor predefinido, el proceso de maquinado debe detenerse, enviando una señal al operador para verificar o para sustituir la herramienta. Este método es principalmente usado para detectar la ruptura de herramienta, puesto que, en tal caso, la variación de la corriente resulta muy evidente. Un segundo método, usado con éxito en el medio industrial, es monitorear la emisión acústica del proceso de corte [2, 3]. Se trata de una estrategia similar al método anterior, cuando la señal alcanza un límite predefinido, el proceso de corte es interrumpido. Los trabajos realizados en la Universidad Técnica de Varsovia, Polonia [2], presentan una técnica para detectar el desgaste de la herramienta usando análisis estadístico de la emisión acústica. En la Universidad Técnica de Chemnitz, Alemania, el método del análisis de la emisión acústica ha sido también usado para estimar la calidad de la superficie maquinada durante un proceso de torneado [3].

En el Laboratorio de Ingeniería Mecánica en Tsukuba, Japón, se desarrolló una aplicación de la transformada Wavelet para la predicción en línea de la fractura de la herramienta durante un proceso de maquinado [4]. En ese caso, la señal monitoreada fue la fuerza de corte tomada (sensada) a nivel de la mesa de trabajo. El trabajo presentado en [5], realizado por la Universidad de Paderborn, Alemania, presenta un sistema de multisensores basado en redes neuronales, para monitorear la correlación entre variables durante el proceso para evaluar la condición de la herramienta.

La estrategia común de todos los trabajos anteriores ha sido la aplicación de métodos indirectos para estimar la condición de la herramienta. Estos métodos normalmente se basan en el monitoreo de señales físicas, como la emisión, acústica, la fuerza de corte y la corriente del husillo, para encontrar su correlación con el desgaste o fractura de la herramienta. Así, en esos casos, el problema principal consiste en encontrar una función de correlación entre las señales y el desgaste de la herramienta o la fractura. La fiabilidad de la correlación entre las medidas indirectas y la condición de la herramienta es un problema de solución difícil cuando varias señales presentan correlación cruzada que influyen en la condición de la herramienta. Como resultado de esto, el trabajo presentado en [6] propone un método de visión por computadora [7, 8] y de monitoreo de las fuerzas de corte para estimar el desgaste de la

herramienta. Basado en un análisis experimental, una curva de desgaste de filo es estimada para determinar una predicción de la vida de la herramienta. Una revisión de métodos indirectos para el monitoreo del desgaste de herramienta es presentada en [9].

Siguiendo la idea de un monitoreo directo, los trabajos realizados en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica en Tsukuba, Japón, presentan en [10] un método para detectar fractura en la herramienta usando un sensor de proximidad de tipo láser. Sin embargo, como es bien conocido, los reflejos de la luz láser pueden producir daños en los ojos.

El trabajo presentado en este documento propone un método directo para monitorear la condición de la herramienta en línea, mientras la herramienta está trabajando. Este trabajo se desarrolla en la Universidad Autónoma de Querétaro, México. La contribución principal es proponer un método directo innovador, basado en un sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO), también llamado sensor fotónico, para monitorear el desgaste de la herramienta en tiempo real con una resolución de menos de 1 micra.

DESCRIPCIÓN DEL SENSOR

El crecimiento de la actividad en el área de sensores de fibra óptica ha generado valiosos dispositivos de medición que emplean técnicas de interferencia, modulación de longitud de onda, polarización (Johnson, 1985). Además, ya que la luz emitida por este tipo de sensor proviene de un fotodiodo, esta no produce daño a los ojos, y es entonces más segura que los sensores láser de desplazamiento. Una fibra óptica es un filamento de vidrio flexible capaz de transmitir luz a través de su longitud manteniendo reflexión interna casi total de extremo inicial hasta el final, como se muestra en la figura 3.

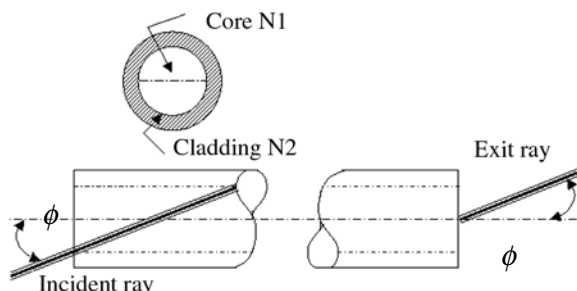


Figura 3. Filamento de fibra óptica.

Para obtener máxima reflexión interna, el índice de refracción del centro del vidrio (N_1) debe ser más grande que el índice de refracción de la cubierta (cladding) (N_2). La apertura numérica de la fibra (n_A) se define como

$$n_A = \sin \frac{\phi}{2} = \sqrt{N_1^2 - N_2^2} \quad (1)$$

que es el ángulo máximo al que la luz incidente en la cara de la fibra puede ser captada por el centro y reflejada a lo largo de su longitud. El rayo de luz al final de la fibra está también limitado al mismo ángulo. El principio básico empleado por los transductores de fibra óptica (Cook, 1979) para detección de desplazamiento es usar dos grupos de fibras ópticas: uno que lleva la luz desde una fuente distante hasta una superficie objetivo, y otro que recibe la luz reflejada desde la superficie objetivo hasta un fotosensor; la configuración se muestra en la figura 4. La luz emitida por uno de los grupos de fibras (fibras emisoras, T) es reflejada y recolectada por otro grupo de fibras (fibras receptoras, R). Como resultado, la luz devuelta al detector es modulada por la distancia de separación entre las fibras y la superficie objetivo. Para cuestiones de análisis, se trabajará con un modelo simplificado que asume que una fibra emisora está rodeada de seis fibras receptoras, todas de radio r_0 como se muestra en la figura 5.

Esta figura muestra el reflejo sobre el plano de la superficie objetivo. El área de las fibras receptoras iluminada por la luz reflejada (anillo reflejado de radio x) es proporcional a la distancia al objetivo y . La distancia dx representa las variaciones de x cuando la distancia desde el extremo de la fibra varía dy . Los parámetros característicos asociados a este sensor pueden ser determinados a partir del conocimiento de ángulo ϕ y el nivel de la emitancia de la luz de salida, las relaciones geométricas entre fibras emisoras y receptoras y la distancia entre

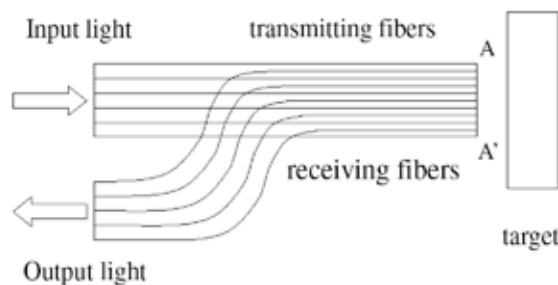


Figura 4. Configuración del transductor.

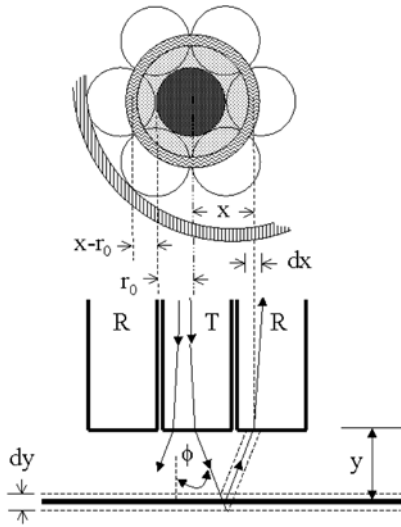


Figura 5. Corte seccional del sensor.

el extremo de la fibra y la superficie objetivo (Johnson, 1985; Hoogenboom, 1984).

Las relaciones matemáticas del sensor de desplazamiento, como la sensibilidad geométrica, la sensibilidad de desplazamiento, el límite óptico de detección y el límite de detección de desplazamiento, están claramente derivadas en (Castillo, 2002).

Respecto al ancho de banda, que constituye una característica muy importante para el proceso de adquisición de este proyecto, la bibliografía no reporta ninguna limitante, por lo tanto, esta quedará determinada por la electrónica.

El SPFO usado en este trabajo, mostrado en figura 6, es un dispositivo de fibra óptica modelo KD-300 de los Instrumentos de MTI, con una punta de prueba tipo MT-2125-R.

Las características principales de este sensor son:

- Diámetro de punta de sonda: 2.28 mm.
- Respuesta de frecuencia de máximo: 150 KHz.
- Límite de detección: 0.25 μ m.
- Sensibilidad del desplazamiento: 0.76 m/mV.

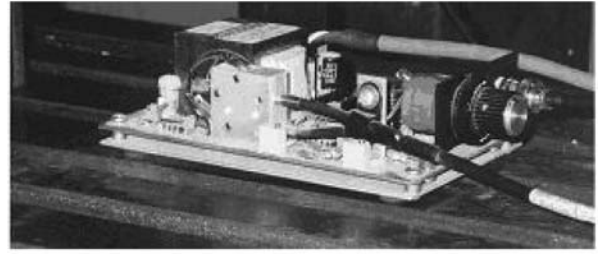


Figura 6. El sensor fotónico.

- Rango lineal: 3.05 mm.
- Distancia del alejamiento: 6.09 mm.
- Pico óptico: 1.22 mm.

La punta óptica de prueba tiene dos grupos de fibras conjuntadas. El sensor convierte la cantidad de luz reflejada en una señal eléctrica que es proporcional a la distancia de la punta de prueba a la superficie objetivo. La curva de respuesta que relaciona el voltaje de salida y la separación a la superficie objetivo es mostrada en la figura 7. La parte de subida inicial de la curva, llamada pendiente frontal, es muy sensible y constituye el rango normal de operación del sensor para mediciones de alta precisión. La parte descendente de la curva, llamada pendiente trasera, es utilizada para mediciones que requieren una distancia de separación más elevada.

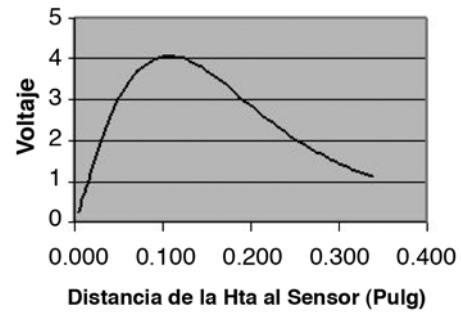


Figura 7. Curva de Respuesta.

ARREGLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental para este trabajo está compuesto por una máquina VMC SHIZUOKA 3-EJES, una tarjeta de adquisición de datos con el periodo de muestreo de 150 KHz, el SPFO, y un PC con un procesador de Pentium a 400 MHz.

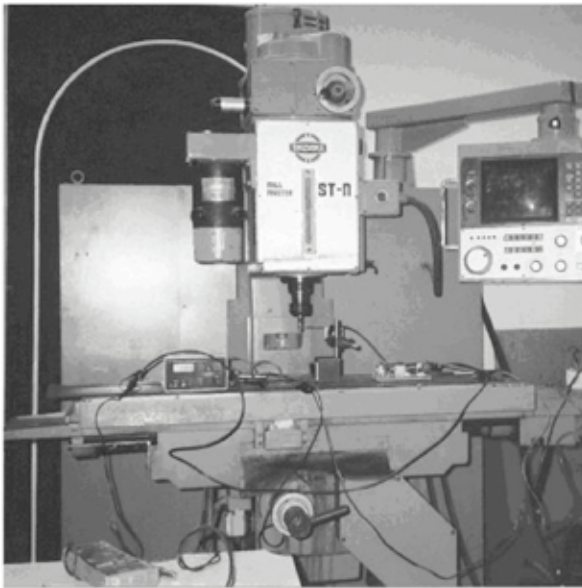


Figura 8. Arreglo experimental.

El sensor se montó en una base magnética y se ubicó frente a la herramienta mientras esta giraba, como es mostrado en la figura 9, a una distancia de 2 mm para observar el perfil de la herramienta durante el movimiento. El sensor trabajó en la pendiente frontal para aumentar la sensibilidad de la medida. La rotación de velocidad del husillo principal fue de 300 rpm.

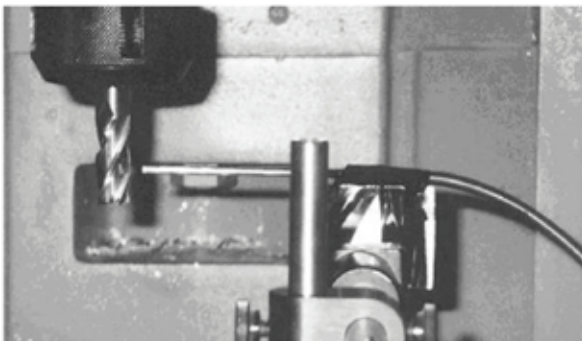


Figura 9. Sensor y herramienta de fresado.

RESULTADOS

La figura 10 muestra la respuesta del sensor cuando uno de los cuatro flancos de la herramienta de corte está desgastado. Se puede identificar claramente cada uno de los flancos de la herramienta en cada una de las vueltas mientras gira.

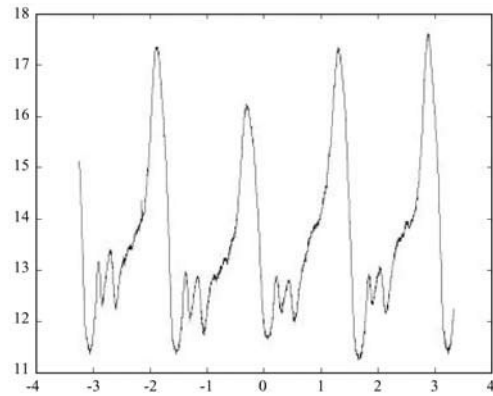


Figura 10. Voltaje de salida contra el tiempo.

La figura 11 muestra la gráfica polar del sensor correspondiente, el desgaste se localiza después de 330 grados.

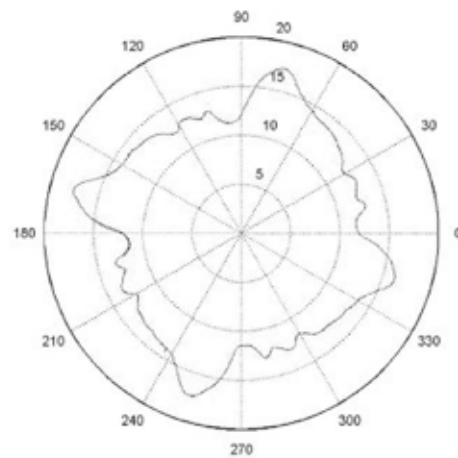


Figura 11. Gráfica polar del desgaste.

CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha presentado un método directo para la detección en línea del desgaste de una herramienta de corte. En lugar de un sensor de desplazamiento láser, de costo muy elevado, el sensor fotónico empleado proporciona mediciones de muy buena calidad del desgaste. El método directo desarrollado en este proyecto tiene la capacidad de reconstituir el perfil de la herramienta después de una sola vuelta de la herramienta, de esta forma brinda una medición rápida y suficientemente precisa del desgaste. Para proteger la punta de prueba del sensor de viruta de metal durante el proceso de corte, se puede inyectar aire comprimido a un lado del sensor. La curva de respuesta del sensor depende del tipo de material de la superficie de

contacto, por lo que la señal de distancia respectiva debe ser calibrada para cada nueva herramienta. Esta técnica también puede ser utilizada para resolver problemas de detección en línea de fallas como la detección automática de fallas en placas de metal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a la Universidad Autónoma de Querétaro, México, por brindar su apoyo para desarrollar este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] E. Castillo-Castañeda. "On line wear detection of milling tools using a Displacement Fiber Optic Sensor". *Journal of Applied Research and Technology*. Vol. 1 N° 2. July 2003.
- [2] K. Jemielniak and O. Otman. "Catastrophic Tool Failure Detection Based on Acoustic Emission Signal Analysis". *Annals of CIRP*. Vol. 47/1, pp. 31-34. 1998.
- [3] W. Meyer, U. Neumann and H. Hörl. "Acoustic Emission Measurement for Quality Control and Process Monitoring in Cutting Operations". Report of the Technical University of Chemnitz. Faculty of Mechanical Engineering and Material Processing. Germany. 1996.
- [4] N. Kasashima, K. Mori and N. Taniguchi. "On line Failure Detection in Face Milling Using Discrete Wavelet Transform". *Annals of the CIRP*. Vol. 44, pp. 483-487. 1995.
- [5] D. Barschdorff, L. Monostori, T. Kottenstede, G. Warnecke and M. Müller. "Cutting Tool Monitoring in Turning under Varying Cutting Conditions: An Artificial Neural Network Approach". *Proceedings of the Sixth International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*, pp. 353-359. Edinburgh. Scotland. 1993.
- [6] A. Novak. "On-Line Prediction of the Tool Life", *Annals of the CIRP*. Vol. 45, pp. 93-96. 1996.
- [7] Kurada and C. Bradley. "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring", *Computers and Industry*. Vol. 34 N° 1, pp. 55-72. 1997.
- [8] D.C. Oguamanam, H. Raafat and S. M. Taboun. "A machine vision system for wear monitoring and breakage detection of single-point cutting tools". *Computers in Industrial Engineering*. Vol. 26 N° 3, pp. 245-251. 1994.
- [9] E. Dimla and Snr. Dimla. "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations-a review of methods". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*". Vol. 40, pp. 1073-1098. 2000.
- [10] O. Ryabov, K. Mori, N. Kasashima, K. Uehara, "An In-process Direct Monitoring Method for Milling Tool Failures Using a Laser Sensor". *CIRP Annals*. Vol. 45 N° 1. 1996.