

# Comportamiento del acabado superficial de la pieza y el desgaste de la herramienta al fresar aluminio con altas velocidades de corte en fresadoras cnc convencionales.

**F. Martínez Aneiro\*, T. Sánchez Battaille\*, G. Frías Figueroa\*\*, A. Pinilla Vázquez\*\*.**

\*Departamento de Tecnología de la Construcción de Maquinarias, Facultad de Ingeniería. Mecánica.CUJAE.

fmartinez@mecanica.cujae.edu.cu, battaille@mecanica.cujae.edu.cu

\*\*INMUNOENSAYO inponchador@cie.sld.cu

(Recibido el 25 de Junio de 2005, aceptado el 14 de Septiembre de 2005)

## Resumen

La demanda de componentes mecánicos de alta calidad y gran exactitud para sistemas de elevado desempeño esta aumentando considerablemente en los últimos años a nivel mundial. Este hecho ha provocado el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a los procesos de corte.

El desarrollo integral de las máquinas herramientas (controles, husillos de alta velocidad) de las herramientas de corte (nuevos materiales para los sustratos y capas) y de la tecnología de maquinado posibilitó la aplicación del corte con altas velocidades de corte (High speed Cutting HSC). El aumento de las velocidades de corte es una de las formas de aumentar la eficiencia de los procesos productivos a través de la reducción de los tiempos de fabricación. La reducción en varias veces de los tiempos de fabricación, se logra no solo por los tiempos de maquinado sino también por la sustitución o minimizar otros procesos de elaboración que forman parte de la cadena productiva, los cuales en ocasiones son relativamente lentos como son la electroerosión, el acabado manual en la producción de moldes y troqueles así como los cambios de operaciones de la pieza.

Por ser un proceso relativamente nuevo, introduciéndose a partir de la década de los años 90 aun existen muchas cuestiones tecnológicas que están sin respuesta. Es interés del presente trabajo, mostrar los efectos de las altas velocidades de corte sobre la vida útil de la herramienta y el acabado superficial en la pieza, trabajando en máquinas fresadoras de CNC "convencionales". Los resultados muestran que dentro de los parámetros estudiados la durabilidad de la herramienta y el acabado superficial mejoran y que el comportamiento de la máquina es estable a pesar de no estar concebida para el nuevo concepto de altas velocidades.

**Palabras Claves:** Altas velocidades de corte, HSC, HSM desgaste, acabado superficial.

## 1. Introducción.

Los avances en la tecnología de corte y de las máquinas herramientas están posibilitando la utilización de mayores velocidades de corte y avances, algunos autores afirman que el termino "maquinado con altas velocidades de corte" (HSC) se relaciona con la utilización de velocidades de corte de 5-10 veces comparadas con las velocidades de corte y de rotación utilizadas usualmente. El proceso de fresado aplicando la tecnología de HSC se utilizo por primera vez en la industria aeroespacial para la elaboración de aleaciones ligeras principalmente de aluminio. Uno de los sectores que se esta beneficiando de esta innovación tecnológica en la actualidad, es el sector de la fabricación de herramientas.

Las mayores ventajas de la aplicación de la tecnología de corte con altas velocidades de corte están relacionadas con las elevadas tasas de remoción de virutas reducción de los tiempos entre las diversas operaciones del proceso productivo, bajos esfuerzos de corte lo que posibilita el maquinado de paredes finas sin distorsión de forma, disipación de calor a través de la viruta y con ello, reducción de las distorsiones y daños térmicos de la pieza, capacidad de obtener buenos niveles de acabado superficial, reducción de las rebabas, facilidad de remoción de las virutas de la región de corte y simplificación del herramental.

El proceso de maquinado HSC produce piezas con elevado acabado superficial y elevadas productividades. Además de eso esta tecnología permite cortar materiales con elevada dureza que es el caso de los aceros

herramientales propios para la elaboración de piezas para moldes y matrices. Sin embargo las herramientas de corte, desarrollando estas velocidades alcanzan altas temperaturas en la región de corte y teóricamente están sujetas a un mayor desgaste.

A pesar de estar siendo utilizado en la industria en diferentes aplicaciones, muchos aspectos de este proceso de alto desempeño, aun están siendo investigados pues no todo es conocido. Existe también poca información sobre el tema en el campo de las vibraciones, el desgaste de la herramienta y el acabado superficial asociadas al proceso para las elevadas variables de maquinado.

Es por ello que se están desarrollando diversos trabajos para profundizar en el HSC para diferentes procesos de maquinado enfatizando en el maquinado de moldes y matrices. Esto permitirá disponer de más literatura para divulgar los resultados.

La literatura sobre el tema desarrolla investigaciones sobre máquinas herramientas diseñadas especialmente para trabajar con altas velocidades de corte (HSM) y preparadas para soportar estas condiciones de trabajo. Estas máquinas sus costos son muy elevados y son privativas del mundo desarrollado. Sin embargo en muchos países existen muchas máquinas CNC con tecnología convencional las cuales llamaremos CNC “convencionales”.

Es interés del departamento de Tecnología de la Facultad de Mecánica de la CUJAE investigar la aplicación del HSC y en particular en estas máquinas y hasta donde es posible su aplicación para lo cual tiene una línea de investigación en esta dirección.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento del desgaste de la herramienta y el acabado superficial al elaborar aluminio en operaciones de fresado y con una máquina fresadora CNC convencional y se comparan estos resultados con valores semejantes obtenidos en una máquina CNC de alta velocidad.

## **2. Caracterización de los parámetros para trabajar con HSM.**

Uno de los parámetros que más influye en el trabajo con HSC es la velocidad de corte la cual puede ser hasta 10 veces superior a las velocidades comunes de trabajo. Esto, por lo tanto implica que las revoluciones de trabajo del husillo de la máquina sean incluso superiores a las 25000rpm para poder aplicar los nuevos parámetros de corte. Hay que recordar que la relación entre velocidad y r.p.m es lineal. También hay una dependencia lineal entre la velocidad y el avance por lo que resulta en elevados avances sobre todo cuando los valores de este se toman en avance por diente de la fresa.

Para compensar los esfuerzos que se crean con las altas velocidades y avances los valores de la profundidad de corte se toman pequeños comparados con el corte convencional. Esto pudiera entenderse que el volumen de viruta cortada pudiera disminuir lo cual puede ser cierto en algunos casos, pero en la realidad como las velocidades de corte y de avance son tan altas el volumen total de viruta cortada es superior.

## **3. Condiciones actuales que facilitan la aplicación de nuevas tecnologías de maquinado**

En el contexto de la industria mecánica actual, concurren toda una serie de factores que posibilitan la introducción de modernas tecnologías que contribuyen a mejorar la efectividad y eficiencia de estos procesos. Entre los más importantes se pueden mencionar:

- Exigencias del mercado de mayor calidad, complejidad y precisión de los productos.
- Reducción de los plazos de entrega para lo cual se requiere la reducción de los tiempos de las operaciones tecnológicas.
- Mejoramiento de la calidad de los materiales.
- Mejores acabados superficiales.
- Menores costos de los productos.

Debido a la reducción sensible de la vida útil de los herramientas, motivado por los cambios frecuentes de diseño de los elementos que intervienen en la fabricación de equipos, sobre todo los vinculados con la industria electrónica, se produce un incremento sostenido de los herramientas de los moldes y matrices. Este incremento del mercado junto a los factores antes mencionados hace que estas industrias, ante la competencia internacional, busquen alternativas tecnológicas de producción que satisfagan las exigencias actuales.

La introducción de la tecnología HSM contribuye a dar respuesta a estas exigencias. El HSM posibilita la reducción de los tiempos de maquinado pues se trabaja con velocidades muy elevadas, se reducen las operaciones tecnológicas al realizarse las piezas en ocasiones, en una única colocación, se eliminan operaciones de electroerosión y acabados manuales. Otra ventaja importante es que posibilita la elaboración de materiales endurecidos del orden de 60 HRC lo cual da la posibilidad de tratar térmicamente las piezas antes de comenzar el proceso de corte.

También al introducirse las aleaciones ligeras como las de aluminio, en la fabricación de los herramientas, es posible incrementar aun más las velocidades de corte y reducir los tiempos de maquinado.

Sin embargo, esta nueva tecnología debido a su novedad trae aparejado toda una serie de dificultades e incluso desventajas, muchas de las cuales aun no están resueltas. Entre las más importantes se encuentran:

desgaste elevado de la herramienta, necesidad de máquinas herramientas especiales con ejes sofisticados, controles con elevadas velocidades de respuesta, necesidad de balancear las herramientas y encapsulamiento de la máquina debido a la elevada energía cinética de la herramienta y la salida de la viruta. Además, este tipo de maquinado requiere de controles con mayores velocidades de procesamiento de datos a fin de posicionar correctamente la herramienta (se requieren altas aceleraciones y desaceleraciones) y generar trayectorias de corte optimizadas.

En el campo del maquinado con HSC se investiga en muchos países para mejorar los efectos negativos y reducir las limitaciones de aplicación del proceso.

#### 4. Maquinado de aleaciones ligeras.

Para las aleaciones ligeras, entre ellas el aluminio, son aplicados elevados avances por diente y altas velocidades de corte. Con la utilización de bajos avances por diente se forman virutas de volumen pequeño extremadamente calientes, elevan la temperatura de la superficie maquinada y de la herramienta, es por ello que en muchas ocasiones los valores de los avances se toman altos para reducir este efecto.

Como la altura de la rugosidad media ( $R_z$ ) es función de la velocidad de corte y del avance, manteniendo la velocidad de avance constante, la rugosidad media disminuye con el aumento de la velocidad de corte, sin embargo en los rangos elevados de velocidades la variación de este parámetro se hace menor.

Para el aluminio de baja resistencia mecánica se ha comprobado que una faja óptima de velocidades es del

orden de los 6000m/min. A partir de este valor la rugosidad superficial se deteriora. Este incremento de la rugosidad de corte se debe a la temperatura elevada en la zona de contacto localizada entre la pieza y la superficie de salida de la herramienta.

El ángulo de incidencia recomendado para el maquinado de aleaciones de aluminio es superior a 12 grados.

Pequeños avances por diente del orden de 0.03 mm/diente, también perjudican el acabado superficial cuando las velocidades de corte son superiores a los 6000m/min.

Para el maquinado de aleaciones de aluminio con elementos abrasivos, por ejemplo aluminio al silicio, el trabajo de la herramienta sufre más por la acción abrasiva de las partículas endurecidas. Para aleaciones con 12-21% de Si la longitud de maquinado se reduce en el orden del 20%. En este caso se recomienda la utilización de herramientas de diamante policristalino (PKD). Tanto para aleaciones de Al como para las de Cu las herramientas de acero rápido no tienen un desempeño satisfactorio.

#### 5. Parámetros de trabajo y resultados.

Como parte del trabajo de investigación de las aplicaciones del HSC y de acuerdo con los objetivos establecidos se han seleccionado una serie de parámetros para la investigación.

El material a elaborar es aluminio D16B (Norma Rusa semejante al AU4G o Thyral 1325) con una composición química de:

Componentes (el resto Aluminio) impurezas en % no mayor de:							
Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ni	Zn	Ti
3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1

Tabla 1 Composición química del aluminio D16B (Norma Rusa).

Sus propiedades mecánicas son:

Propiedades	Chapas Con Tratamiento Térmico y Envejecimiento Natural
$\sigma_B \text{ Kg./mm}^2$	44-46
$\sigma_{0,2} \text{ Kg./mm}^2$	29-30
$\delta \%$	17-18
$\Psi \%$	-
$E \text{ Kg./mm}^2$	7100
$G \text{ Kg./mm}^2$	2700
HB	105-130

Tabla 2 Propiedades mecánicas del aluminio D16B.

La herramienta es una fresa de 100mm de diámetro con placas de metal duro P10-20 si recubrir.

Velocidad de trabajo de 800m/min.

Avance por diente de 0.08mm/diente.

Corresponde una velocidad de rotación  $n = 2500$  r.p.m.

Se utilizó una fresadora CNC Dekel con rango de velocidades 10-6300 r.p.m.

Para los ensayos de desgaste se trabajó con todos los parámetros fijos.

Bajo estas condiciones se realizaron cortes de 100 mm de recorrido repitiéndose 16 veces y obteniéndose los siguientes resultados:

No	Desplazamiento mm.	Longitud Corte en m.	Desgaste mm.
1	100	196	0,04
2	100	392	0,07
3	100	588	0,09
4	100	748	0,116
5	100	980	0,128
6	100	1176	0,135
7	100	1372	0,140
8	100	1568	0,140

Tabla 3. Resultado de las mediciones.

(A partir del experimento 7 hasta el 16 los valores de desgaste obtenidos fueron iguales).

En la figura 1 se muestra el comportamiento de los resultados de las mediciones del desgaste en la

superficie de incidencia en mm del calzo, tomado como patrón de la herramienta con respecto a la longitud maquinada medida en metros. Como puede apreciarse en la figura, aparecen los puntos medidos y la tendencia del modelo polinomial. Los resultados muestran una magnitud de desgaste mínima que corresponde con la zona de desgaste inicial y después a partir de este valor (0.140 mm) se encuentra la zona donde se estabiliza el filo cortante, no incrementándose el desgaste para la longitud de corte estudiada. Se realizaron 16 mediciones en total pero a partir de la medición 7 el valor se mantuvo constante.

La longitud de corte se refiere al arco que describe el diente que esta cortando, seleccionado como patrón. Se tomó todo el diámetro de la fresa para cortar lo cual equivale a la mitad de su periferia por vuelta de la misma y se expresó en metros de recorrido para 100 mm de desplazamiento. Esto permitió conocer que el diente cortante recorrería 196 metros para cada 100 mm.

Los resultados indican que a pesar de trabajar con velocidades superiores en mas de 5 veces a las utilizadas normalmente, el desgaste de la herramienta se comporta estable y con valores muy pequeños. Sin lugar a dudas sería interesante continuar investigando en rangos superiores de velocidad.

En la bibliografía consultada se muestran resultados de experimentos donde el comportamiento del desgaste de la herramienta en condiciones semejantes de experimentación es muy semejante.

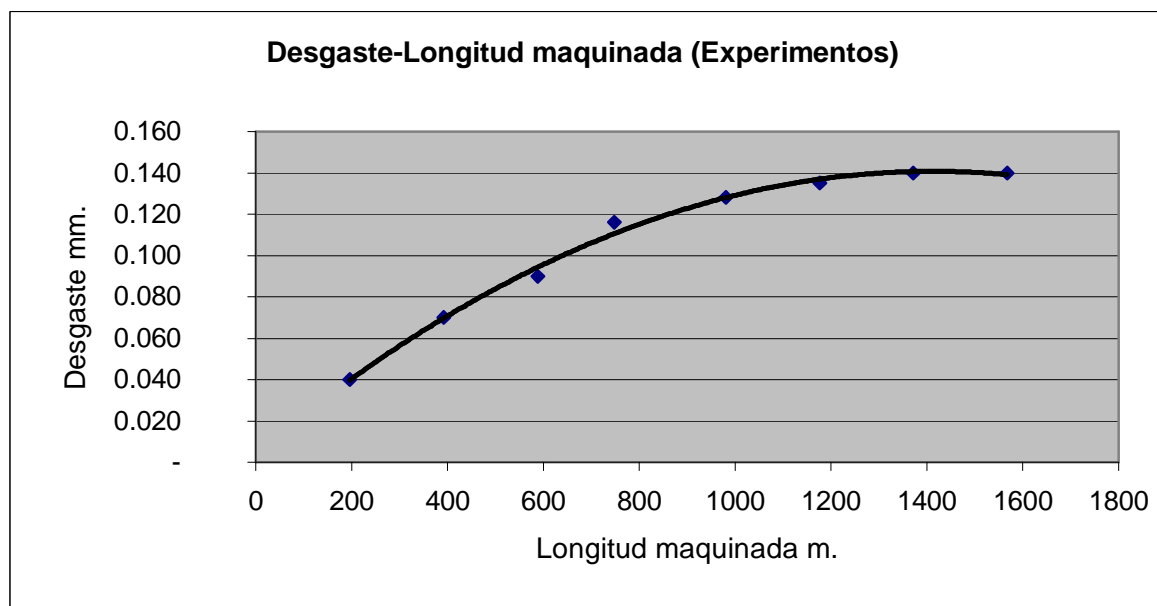


Figura 1. Comportamiento del desgaste de la herramienta con la longitud de maquinado para los valores experimentales.

Los resultados que se muestran en la Figura 2 se corresponden con valores obtenidos en máquinas con condiciones de trabajo para HSC. Como puede apreciarse el comportamiento tanto de los puntos medidos como de la curva de tendencia exponencial, sobre todo para el desgaste, es muy semejante a los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el presente trabajo donde se utilizó una fresadora "convencional" de CNC lo cual permite pensar que también en máquinas convencionales de CNC es posible trabajar con HSC.

En los experimentos realizados la longitud maquinada es mayor que la longitud tomada de la literatura es por esta razón que en el caso de los experimentos realizados la magnitud del desgaste absoluto es algo mayor.

También se procedió a medir la rugosidad superficial bajo las siguientes condiciones:

Velocidad de corte desde 188m/min. hasta 989 m/min.

Velocidad de rotación desde 600 hasta 3150 r.p.m.

$S_o = 0,08\text{mm/diente}$ .

$t = 3\text{mm}$ .

En este caso, dentro de los parámetros estudiados, no se apreció una diferencia sustancial en la magnitud del acabado superficial ( $R_a$ ). Sin embargo en la zona de bajas velocidades se tuvo una fuerte presencia de filo recrecido lo cual empeoraba el acabado cada cierto tramo. En el caso de la zona de altas velocidades no se presentaba el filo recrecido y la zona maquinada se

comportó con un elevado grado de limpieza en la superficie, muy superior a los valores obtenidos con los valores de velocidad convencional. Esto se corresponde con la teoría del corte de metales la cual como se conoce plantea que el filo recrecido en la superficie de ataque de la herramienta en el rango de bajas velocidades crece con rapidez y al alcanzar cierta altura se rompe incrustándose parte del mismo en la superficie elaborada de la pieza. En las zonas de altas velocidades a medida que estas se incrementan la altura del filo recrecido disminuye reduciéndose su efecto negativo sobre la pieza.

En las mediciones realizadas de la rugosidad superficial en todos los casos se estuvo en el rango de  $R_a = 0,06-0,08$ . En estos valores no se tuvieron en cuenta las zonas de la pieza donde producto de la rotura del filo recrecido el acabado empeoraba.

Otro factor muy importante que se comprobó es que tanto la herramienta como la placa maquinada se mantuvieron a muy baja temperatura de tal forma que al terminar el corte ambas se podían tocar con la mano sin mostrar calentamiento alguno al tacto. Esto es muy favorable pues no se provocan distorsiones por temperatura en la placa y la herramienta no sufre por los posibles cambios en sus propiedades mecánicas. No obstante es necesario en experimentos posteriores realizar mediciones de las temperaturas para mostrar la relación existente entre esta y los parámetros del régimen de corte.

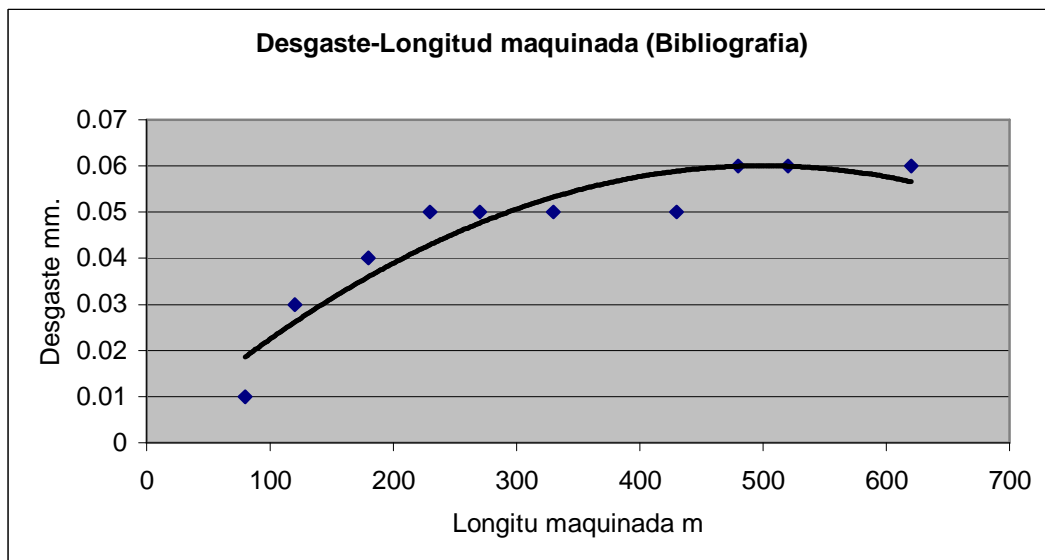


Figura 2 Resultados de desgaste longitud maquinada obtenida de la bibliografía consultada.

## 6. Conclusiones.

Con los experimentos realizados hasta el momento, se puede afirmar que es posible aumentar al menos en 5 veces las velocidades de corte de uso común para la elaboración del aluminio, sin que se produzca un aumento importante del desgaste de la herramienta. Este aumento de la velocidad de corte va acompañado del incremento del avance, pues al seleccionar este en mm/r.p.m. también se incrementa en función de las r.p.m del husillo. Como se hace evidente, el tiempo de maquinado de cualquier pieza, al utilizar estos regímenes de corte se reduce en la misma magnitud contribuyendo a la reducción de los costos de producción del producto.

El comportamiento de una máquina de CNC convencional trabajando con velocidades elevadas fue totalmente normal bajo las condiciones de experimentación. Hay que destacar que tanto la velocidad de corte como los avances utilizados en los experimentos están muy por encima de los utilizados comúnmente en el centro donde estos se realizaron.

Tal como se establece en la teoría del corte de metales en la zona de bajas velocidades estuvo presente el filo recrecido el cual al alcanzar cierta altura se rompe y deteriora la superficie maquinada lo cual no es deseable en los procesos de acabado. Se comprobó que en la zona de velocidades altas (>de 600m/min.) la altura del filo recrecido disminuye a valores admisibles, no teniendo influencia negativa en el acabado superficial.

Para los valores de velocidad utilizados, la rugosidad superficial se mantuvo en valores bajos, menores que los obtenidos con las velocidades que tradicionalmente se trabajaba en el centro de referencia (160m/min.)

Debe profundizarse más en el comportamiento del acabado superficial aumentando las velocidades de corte y el avance y determinar con más claridad la influencia de la profundidad de corte.

Las temperaturas que alcanzan tanto la herramienta como la pieza se mantienen muy bajas lo cual constituye una ventaja importante.

## 7. Bibliografía.

1. J. Oliveira Gómez. R. Vargas Vallejos. Fresamento HSC de ligas de aluminio. Usinagem em altíssimas velocidades. Editorial Erica 2003 pp 39-48.
2. F. Garcia de Olivera HSM. Conceito e aplicaciones. Usinagem em altíssimas velocidades. Editorial Erica 2003 pp 29-35.
3. R. Tixeira Coelo. o desgaste da ferramenta no rosqueamento de ferro fundido cincento com altas velocidades. Usinagem em altíssimas velocidades. Editorial Erica 2003 pp 82-93.
4. H. Schulz, The History of High Speed Machining. Revista de Ciencia y Tecnología vol. 7, 13 1999 pp. 9-18.
5. R. E. Heber, A. Alique, J. R. Alique, R. Haber-Haber y S. Ros. tendencia actual y desarrollos futuros de nuevos controles basados en la lógica borrosa y su aplicación al mecanizado a alta velocidad. Revista de Metalúrgica. Madrid 38 2002 pp.124-133.
6. T. Schmitz, D. Matthew, B. Dutterer, and J. Ziegert. The application of high speed CNC machining to prototype production. International Journal of Machine tools and Manufacture. V 4 June 200 pp1209-122.

## Superficial finish behavior and tool wear in aluminium milling with high cutting speeds in conventional CNC milling machines.

### Abstract.

The demand of mechanical components of high quality and great accuracy for systems of high performance is increasing considerably in the last years at world level. This fact has caused the development of new applied technologies in cutting processes.

The development of machine tools (control, high-speed spindle), the cutting tools (new materials, substrata and layers) and the technology of machining, facilitated the application of cut with high cutting speed (High speed Cutting HSC). The increase of cutting speeds increases the efficiency of the productive processes through the reduction of the manufacturing times. The reduction in several times of the manufacturing process, is not achieved alone for the time of machining but also for the substitution of other elaboration processes that are part of the productive chain that are relatively slow in occasions as the electroerosion (spark erosion), the manual finishing in molds and dies production as well as the changes of spare operations. Being a relatively new process introduced starting from the decade of the 90's; many technological questions are still without answer. This paper presents the benefit of the high cutting speeds HSC on the tool useful life and the superficial finishing in spares, working in conventional milling machines of CNC. The results stated, that within the studied parameters, that the durability of the tool and the surface roughness improve and that the behavior of the machine is stable in spite of not being conceived for high speeds.

**Keywords:** High speed cutting, HSC, HSM, Wear, surface roughness.