

Análisis de las especificaciones de producto para procesos de micromecanizado

Analysis of the product specifications for micromachining processes

Noguera Gottberg, María Alejandra*

Dpto. Tecnología y Diseño. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, ULA,
Mérida 5101, Venezuela

*marianoguera@ula.ve

Resumen

En los últimos años el desarrollo de la microtecnología ha tenido un gran auge, y con ello los procesos de microfabricación han ido evolucionando para dar respuesta a la producción de piezas con una dimensión inferior a 500 μm . El presente trabajo tiene como finalidad analizar las posibles especificaciones técnicas requeridas para la fabricación de productos mediante procesos de micromecanizado. En el diseño de producto, se debe disponer de información que permita definir en forma amplia y precisa especificaciones que puedan ser traducidas en parámetros, restricciones y criterios. Es importante señalar, basándose en toda la información recabada, que la microfabricación requiere de una amplia investigación en los procesos de arranque de viruta, específicamente en aspectos como predicciones de la fuerza de corte, manipulación, montaje, propiedades de los materiales, modelos y pruebas; esto con el fin de definir la verdadera ventaja en función de la aplicación y productividad de este tipo de procesos. La investigación de los procesos de micromecanizado es relativamente nueva y se requiere de muchos más estudios para responder a sus muchas preguntas desafiantes.

Palabras clave: Microfabricación, especificación de producto, micromecanizado.

Abstract

In recent years the development of microtechnology has boomed, and thus microfabrication processes have evolved in response to the production of parts with a size less than 500 microns. This paper aims to analyze potential technical specifications required for the manufacture of products using micromachining processes. In product design, information must be available to define broadly accurate specifications that can be translated into parameters, constraints and criteria. Importantly, based on all the information gathered, the microfabrication requires extensive research in metal removal processes, specifically in areas such as prediction of cutting force, handling, assembly, material properties, and testing models; this in order to define the real advantage in terms of implementation and productivity of these processes. The investigation of the micromachining processes is relatively new and requires much more research to answer your many challenging questions.

Key words: Microfabrication, product specification, micromachining.

1 Introducción

El mecanizado en general comprende una gran cantidad de posibilidades con respecto a las piezas que necesitan de un proceso de remoción de material para producirlas.

En los últimos años la demanda del mercado de productos basados en la microtecnología ha ido en aumento. Esto ha ocasionado principalmente por el impulso que ha generado la industria electrónica al crear la necesidad de

desarrollar productos aún más pequeños con mayor capacidad. Es importante señalar, que un microproducto se caracteriza por dimensiones reducidas, ya sea del producto en sí o en sus estructuras funcionales. El micromecanizado involucra el mecanizado de bloques de material de un máximo de 3cm, que pueden llegar a longitudes inferiores a un milímetro.

En respuesta a esta necesidad ha surgido la microfabricación, que representa un enfoque totalmente nuevo, pues

se refiere a un “conjunto de procesos que intervienen en la fabricación de productos en miniatura, cuyas dimensiones se encuentran en el orden escala de los micrómetros y aún más pequeñas” (Liu y col., 2004). A través de una visión general, se puede decir que la microfabricación es un término que puede ser empleado cuando se producen piezas con una dimensión inferior a 500 μm (Alting y col., 2007). En la siguiente figura se puede observar el rango de escala y precisión de las piezas micromecanizadas en comparación con otros procesos de fabricación.

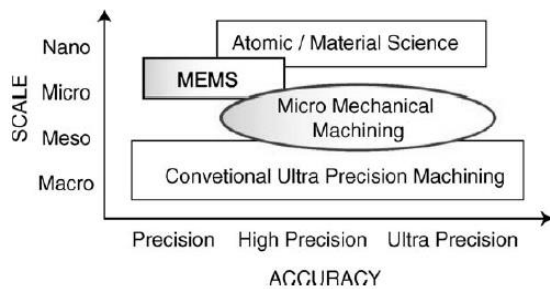


Fig.1. Rango de escala y precisión de piezas micromecanizadas (<http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtecnologias/1-3-terminology/1-3-2-microengineering-technologies-met>)

Dentro del grupo de procesos de microfabricación se encuentra el micromecanizado, cuyo objetivo principal es la obtención de la geometría de la pieza final a través de la remoción de material.

El micromecanizado encierra una familia de procesos dentro de los cuales se pueden nombrar: microtornado, microfresado, microlimado, entre otros. Cada uno de estos procesos genera una geometría particular, pero cuando se emplean de manera conjunta es posible obtener productos de formas más complejas.

Estos productos obtenidos deben cumplir con especificaciones que puedan ser traducidas en parámetros, restricciones y criterios. Es en este momento cuando el diseño del producto juega un papel fundamental; pues como plantea García (2010), permite definir en forma amplia y precisa aspectos como: entradas deseadas (insumos), entradas indeseadas, salidas deseadas (producto), salidas indeseadas, restricciones a las entradas (por ejemplo: límites, especificaciones, entre otros), restricciones al sistema (por ejemplo: volumen, peso, velocidad, entre otros), restricciones a las salidas (por ejemplo: dimensiones, tolerancias, entre otros), medidas de valor para cuantificar el análisis y criterios para medir la validez del sistema.

En aplicaciones como la relojería este campo es muy importante, ya que una gran cantidad de piezas son de pequeño tamaño. Entre ellas se puede mencionar el trinquete, los piñones o el cañón para las agujas, los cuales son ejemplos de piezas que son micromecanizadas.

Es por esta razón, que en este tipo de procesos las tole-

rancias tienen que ser mínimas, es decir, la precisión de las máquinas-herramientas empleadas tienen que posibilitar un mínimo valor de discrepancias de la pieza a mecanizar.

El propósito general del presente trabajo es analizar las posibles especificaciones técnicas requeridas para la fabricación de productos mediante procesos de micromecanizado; considerando la fase de diseño, selección de materiales, proceso y ensamblaje.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se presenta los fundamentos asociados a la microfabricación, se enuncia el área problemática enfocándose en el micromecanizado, a fin de comprender los elementos fundamentales en cuanto a la especificación del producto.

En la sección 3 se desarrolla un marco teórico referencial en el cual se plantea una síntesis de aspectos conceptuales, metodológicos y empíricos que permiten abordar el problema de investigación desde el punto de vista de la microfabricación en ingeniería mecánica. En la sección 4 se presenta el análisis e interpretación de la información, donde se identifican los aspectos más importantes del análisis de las posibles especificaciones de productos a obtener mediante proceso de micromecanizado. La sección 5 presenta las conclusiones y recomendaciones.

2 Fundamentos del Micromecanizado

En la ingeniería mecánica, para alcanzar el desarrollo de productos, es necesario contar con el apoyo de los conceptos ofrecidos por áreas como ciencia de los materiales, mecánica de materiales, procesos de manufactura, tecnología de producción, entre otros. Generalmente, se determinan los requisitos a los elementos funcionales sobre la base de los esfuerzos esperados, condiciones de funcionamiento y requisitos de rendimiento para el producto final.

Es por ello que el concepto de producto es una descripción aproximada de la tecnología, principio de funcionamiento y la forma, a fin de satisfacer las necesidades de los clientes (Chae 2005).

En el proceso de desarrollo se debe considerar la fase de diseño a través del establecimiento de tolerancias, dimensiones de la pieza y acabados superficiales (García 2011). Estos elementos afectan un aspecto importante de la funcionalidad, ya que el ensamblaje mecánico de los elementos es un tema clave.

Por otro lado se encuentra la definición del material, pues este debe cumplir con las características de las propiedades requeridas. En este mismo orden de ideas, el material de la pieza también debe ser compatible con el proceso de fabricación; en este aspecto es importante introducir el concepto de factibilidad que como lo plantea García (2011) responde a la siguiente interrogante: ¿Es posible obtener la pieza con el material y el proceso de fabricación seleccionado? El evaluar este aspecto, permite tomar una decisión con respecto a los métodos de fabricación más adecuados.



Fig.2. Piezas micromecanizadas
(<http://www.nsmppinc.com/micromachining.php>)

En cuanto al proceso de fabricación es necesario considerar: la máquina, la herramienta y los parámetros de trabajo (condiciones de corte, fuerzas, potencia requerida, entre otros).

En general, el diseño de un producto debe tener en cuenta los siguientes puntos importantes: a) diseñar para la funcionalidad óptima, b) diseñar para la producción en masa, c) diseñar para un costo mínimo en la fabricación, d) diseñar para la capacidad de prueba, y e) diseñar considerando los efectos ambientales (Quintana y col., 2011).

Lo importante de este aspecto, es saber cómo extrapolar esta caracterización cuando se trata de aplicar las reglas de los macro a micro productos y sus componentes. Esto se debe, a que en este aspecto el control dimensional es de vital importancia, y establece la relación entre la funcionalidad requerida, las especificaciones, y las tolerancias finales de los componentes.

Es por ello que Socorro y col., (2013) establecen que en cuanto a microfabricación se refiere, cuando se requiere de información sobre procesos no basados en técnicas litográficas (que son lo que han sido las impulsadas por la industria microelectrónica), ésta se deriva de la disponible para procesos a escala macro, pues en general esta área se encuentran todavía en etapas iniciales de desarrollo. Sin embargo, es importante señalar que muchos de estos procesos de fabricación no son fácilmente escalables, lo cual implica que los diseñadores no cuentan con herramientas contrastadas para el diseño a micro escala. Las reglas de diseño aplicadas a la macro escala, no son aplicables a escala micro en bastantes ocasiones, y se requiere una nueva perspectiva de diseño. Algunas de estas herramientas de diseño pueden ser adaptadas de las existentes a escala macro, mientras que otras han de ser básicamente diferentes.

Los estudios en el área de micromecanizado, resultan muy importantes dentro de la microfabricación, especialmente para la producción de piezas complejas, que requieren una variedad de materiales, interfaces y formas funcionales. Sin embargo hoy en día se desarrollan gran cantidad de investigaciones en torno a la definición de parámetros

particulares para estos procesos. Cuando se habla de micromecanizado es necesario considerar dentro del diseño del producto, además de los aspectos mencionados anteriormente, aspectos inherentes al proceso de fabricación como son: material y geometría de la herramienta, características de la máquina-herramienta, proceso de formación de viruta, material de la pieza de trabajo, fuerzas de corte, y desgaste de la herramienta, entre otros.

3 Consideraciones básicas en los Procesos de Micromecanizado

Se puede decir que el campo de la fabricación a escala macro o macrofabricación, está mucho más avanzado y desarrollado desde el punto de vista del diseño de productos que el de la microfabricación, por lo que existe una amplia variedad de procesos apropiados para la fabricación de componentes de este tamaño. La fabricación de componentes mecánicos a escala micro es relativamente nueva, pero se está desarrollando a gran velocidad. Aún son pocas las empresas que están desarrollando aplicaciones industriales en este ámbito, sin embargo, existe un gran interés por el gran potencial que poseen.

En lo que respecta a los materiales utilizados en microfabricación son los mismos que en la fabricación a escala macro (acero inoxidable, titanio, latón, aluminio, platino, iridio, plásticos, cerámicas, y materiales compuestos, entre otros). Deben poseer propiedades adecuadas tanto desde el punto de vista de la funcionalidad del componente, como desde el de los procesos de fabricación que se emplearán para obtener el producto deseado. Un aspecto significativo en cuanto al material, y que aún se encuentra en estudio es el comportamiento de las propiedades físico-químicas y de su estructura a micro escala; pues en los procesos de microfabricación características como el tamaño de grano y acabados superficiales son de vital importancia (Chae y col., 2006). Plantea Quijano (2006) que otra consideración relevante radica en que las cantidades de materiales que se emplean son muy pequeñas, en algunos casos los volúmenes de producción anual se miden en centímetros cúbicos. En estos casos surgen barreras para el desarrollo o mejora de nuevos materiales específicos para micromecanizado por cuestiones económicas. Estas aplicaciones requieren tolerancias muy estrechas, por lo que la precisión absoluta que se debe alcanzar en procesos de microfabricación es excelente, del orden de décimas de micra o tiene que ser menor (Rai-Choudhury 1997).

Si una de las exigencias básicas en el micromecanizado es una mínima tolerancia, otra de vital importancia es que la sujeción de la pieza a mecanizar sea la adecuada, ya que al manejar pequeñas dimensiones es muy difícil realizarla de una manera efectiva. Por ello, cualquier operación secundaria fuera de la máquina va a llevar a una pérdida de fiabilidad, por errores cometidos en una nueva colocación. Así, es importante que estas máquinas tengan cabezales giratorios o herramientas activas que les permitan la terminación de la

pieza de pequeño tamaño sin cambiar de posición.

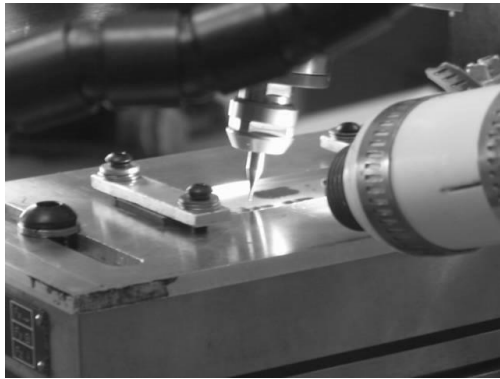


Fig.3. Máquina-herramienta de micromecanizado
(<http://seminarprojects.kreview.com/item.php?id=94>)

Existen una gran cantidad de procesos que se utilizan en la fabricación de microcomponentes. Varios son de carácter genérico por lo que se pueden aplicar a una gran variedad de sectores industriales, mientras que otros son muy específicos y solo se usan para aplicaciones muy concretas. Procesos tales como el mecanizado pueden en principio, responder a estas necesidades, pero hay una serie de retos científicos y tecnológicos que deben ser superados. Esto resulta en cambios significativos en el proceso de formación de viruta, fuerzas de corte, vibraciones y estabilidad del proceso, lo cual define la superficie mecanizada resultante.

Señalan Lucca y col., (1994) que la geometría de la herramienta se considera como una de las características fundamentales dentro del proceso de formación de viruta. En este orden de ideas Ikawa y col., (1992) propusieron que el radio del borde de corte de la herramienta de corte determina el espesor mínimo de viruta. En el mecanizado de metales esta condición está afectada por la fricción que se genera en la zona de contacto viruta – herramienta. Determinar el valor del espesor de viruta permite conocer la geometría del proceso de corte. Por otro lado, Weule y col., (2001) señalaron que la rugosidad superficial permite definir la microgeometría de la superficie requerida en función de parámetros como acabados, ajustes y tolerancias. En un proceso de micromecanizado esta característica depende del comportamiento del material durante el proceso de corte y que la profundidad de corte mínima puede estimarse como aproximadamente 30% del radio del borde de la herramienta de corte. Sin embargo, la mayoría de estos estudios implican trabajo con materiales que son suaves, dúctiles y fácilmente mecanizable.

Como plantea Masuzawa (2000), varios de los estudios de mecanizado en micro y nano escala se han llevado a cabo, en la comprensión básica de la formación de viruta, fuerzas de corte, energía de corte específica y acabado superficial; se ha obtenido respuestas similares o diferentes de los de escala macro, sin embargo, son insuficientes. Además, hay una necesidad de investigaciones en el mi-

cromecanizado de otros materiales de ingeniería, tales como las aleaciones estructurales.

4 Análisis de las características de los procesos de micromecanizado que intervienen en las especificaciones de producto

Para el estudio de las características de los procesos de micromecanizado que intervienen en las especificaciones de producto, es necesario analizarlas una a una.

La definición de las características de las herramientas de corte y máquinas-herramienta empleadas en los procesos de micromecanizado son fundamentales, ya que el acabado superficial de la pieza depende de ello.

El tamaño y la calidad de las piezas fabricadas bajo estos procesos, depende de las propiedades de las máquinas empleadas para su fabricación, incluyendo su precisión global y su rendimiento dinámico. En este orden de ideas Corral, Briones, Galdames y Muñoz (2002) plantean que para obtener un buen acabado superficial en un proceso mecanizado, se debe considerar la combinación de factores que influyen en éste, como son: el radio de la punta de la herramienta y su geometría, el avance, el grado de sujeción y la estabilidad del sistema máquina herramienta pieza.

La capacidad y calidad de la máquina-herramienta es vital para los requisitos del producto tales como dimensiones, tolerancias, rugosidad de la superficie y repetibilidad. Tanka (2001) plantea que los tres principales sistemas de una máquina-herramienta de precisión son el eje, plataforma de precisión y controlador.

En la actualidad, la mayoría de máquinas-herramienta empleadas para micromecanizado se basan en las características técnicas de las convencionales de ultra-precisión, en las cuales se ha controlado de manera especial el aspecto de la vibración y las temperaturas de operación. Sin embargo, investigadores como Jun (2005), Bang y col., (2004) y Kusul (2002) han despertado un gran interés por hacer estudios para construir máquinas-herramientas de pequeña escala para fabricar componentes de tamaño micro. Esta motivación se deriva de minimizar el costo y tamaño de la máquina empleada, al tiempo que aumentar la flexibilidad. Estas investigaciones arrojan fuertes dudas respecto a la precisión de estos micromáquinas-herramientas en comparación las convencionales de ultra-precisión, básicamente por el control de la vibración y la capacidad para accionar basándose en los sensores de precisión y actuadores.

En este orden de ideas, Vogler y col., (2002) señalan que en aplicaciones de micro-mecanizado, la velocidad de rotación del eje debe ser muy alta para mantener aceptable la productividad, ya que el pequeño diámetro de la herramienta disminuye la tasa de arranque de viruta. Sin embargo, estas velocidades con los sistemas que se encuentran disponibles en la actualidad están limitadas, bien sea por la fricción en los cojinetes de contacto que provocan la expansión térmica del husillo, o porque el torque que se produce es muy bajo.

Para la fabricación de micro piezas es necesario alcanzar altas precisiones. Los motores de accionamiento lineal y sistemas de control son comúnmente utilizados ya que no tienen los errores acumulativos de la fricción producida por el acoplamiento, lo cual garantiza que no hay pérdida de precisión debido al desgaste y no hay contragolpe. También este tipo de motores, pueden proporcionar muy altas aceleraciones (Rooks 2004). La precisión típica de máquinas-herramienta de ultra-precisión con el uso de sistemas de accionamiento lineal según lo expuesto por Masuzawa (2000) es $\pm 1 \mu\text{m}$.

En los procesos de micromecanizado la tecnología de la herramienta de corte juega un papel fundamental, pues abarca el material y la geometría. Dentro de los materiales que se emplean para la fabricación de herramientas de corte este tipo de procesos se encuentran las de diamante y de carburo de tungsteno, ampliamente utilizadas debido a que su dureza se mantiene en un amplio intervalo de temperaturas (Lee y col., 2002).

Otro aspecto importante es el de la geometría, que involucra la definición de los tres principales ángulos de la herramienta (desprendimiento, corte e incidencia). En relación a este aspecto Kim y Kim (1995) mencionan, que el radio del borde de corte de la herramienta es relativamente mayor que el espesor de la viruta para evitar deformaciones plásticas o rotura.

Como resultado de este aspecto, la herramienta de corte tiene un gran ángulo de ataque negativo, que afecta a la magnitud de la fuerza de corte y de empuje, produciendo un aumento significativo en la potencia requerida (Shaw, 1995). Weule y col., (2001) y Vogler y col., (2003) coinciden en que el aumento de las fuerzas de corte conduce a la herramienta a un acelerado desgaste, gran desviación y creación de un filo de aportación. Comprender el proceso de formación de viruta en el micromecanizado es importante, pues contribuye a una predicción precisa de las fuerzas de corte. La relación de viruta será menor o igual a uno, ya que el espesor de viruta después del corte siempre es mayor o igual que el espesor correspondiente antes del corte (profundidad de corte). Vogler y col., (2004) señalan que la viruta no se puede formar cuando la profundidad de corte es menor que un espesor de viruta mínimo. Es por esta razón, que la formación de viruta obedece a la definición del espesor mínimo.

La relación entre el radio del borde de corte de la herramienta y el espesor mínimo de viruta, depende del material de la pieza de trabajo y sus propiedades.

En este orden de ideas Son y col., (2005) plantean la determinación del espesor mínimo de viruta está basado en el radio del borde de corte de la herramienta y el coeficiente de fricción entre la pieza y la herramienta. También observaron que la viruta continua se genera en el espesor de viruta mínimo, incidiendo esto en la calidad de la pieza obtenida pues se logra producir un mejor acabado de la superficie.

En micromecanizado, tal y como plantea Altling y col., (2003) la naturaleza de la pieza de trabajo es de vital impor-

tancia puesto que la mayoría de las condiciones de corte, y en especial la profundidad de corte, depende ella. Aun cuando se sigue manteniendo la idea de materiales isotrópicos, el supuesto de homogeneidad en las propiedades del material de la pieza de trabajo ya no es válida. La pieza de trabajo en micromecanizado debe considerarse como un material no homogéneo ya que el tamaño de grano es comparable al tamaño de la viruta. De ser posible, debe darse un tratamiento metalúrgico de la pieza para proporcionar una microestructura con propiedades uniformes, permitiendo así una mejor predicción de fuerzas de corte.

Por otra parte, el manejo del material tiene que ser muy meticuloso. Todas estas máquinas trabajan con barras de aleaciones que han sido previamente tratadas térmicamente, por lo que el cuidado posterior en la fábrica tiene que ser preciso. Una barra que tenga una pequeña alteración en sus características físicas va a dar un resultado de mala calidad. Esto significa, que para lograr acabado con los máximos estándares de calidad, se debe disponer de una materia prima que cumpla con los requisitos mínimos establecidos.

Por lo tanto, un coeficiente de corte promedio no puede ser utilizado para aplicaciones de micromecanizado debido a la geometría de la herramienta, tamaño de grano y la falta de homogeneidad del material de la pieza de trabajo.

En otro orden de ideas, Lee y col., (2002) examinaron la vibración originada por la no homogeneidad del material en las operaciones de mecanizado de precisión. Ellos encontraron que la variación de la cristalografía y orientación del grano incide sobre el ángulo y la resistencia al corte.

Plantean Grum y col., (2003) que la fuerza de corte está en función de la influencia de la microestructura del material de la pieza de trabajo. Utilizando diferentes aleaciones de aluminio y de silicio, observaron que la microestructura afecta de manera significativa la magnitud de la fuerza de corte, tanto en sus componentes estáticos como dinámicos. Cuando la herramienta de corte se acopla de una fase metalúrgica a otra, las condiciones de corte cambian, provocando errores de mecanizado, vibración, o desgaste acelerado de la herramienta.

La predicción exacta de las fuerzas de corte en este tipo de procesos, permite la selección de alimentación óptima para proporcionar la máxima extracción de viruta sin inestabilidad. Esto también permitirá la compensación de desviación de la herramienta y minimizar el desgaste de la herramienta y evitar la formación de filo recrecido.

En cuanto al desarrollo adecuado de técnicas de mecanizado y post- procesamiento para reducir y eliminar las rebabas y virutas residuales en la pieza fabricada también justifica una investigación adicional.

5 Conclusiones

En el presente trabajo se hace una recopilación de los aspectos más importantes relacionados con las características de los procesos de micromecanizado que intervienen en las especificaciones de producto, lo cual es un área de im-

portancia dado el incremento de su aplicación en los procesos de manufactura y diseño mecánico

En la actualidad, hay vacíos que se deben cubrir que corresponden a los requerimientos de diseño de productos obtenidos a través de micromecanizado y las capacidades de los procesos de fabricación actuales. Es necesaria la incorporación de herramientas de modelado y simulación novedosas, que suministren información fiable para el proceso de diseño y desarrollo de estos productos. En este orden de ideas, se debe desarrollar investigaciones que permitan incorporar a los productos micromecanizados recomendaciones de diseño y de fabricación aplicando la normalización y estandarización; así como también, medición y evaluación de las características de la pieza.

Hay que comprobar detalladamente el efecto de factores tales como el borde de corte de la herramienta, desviación de la herramienta, comportamiento elastoplástico de los materiales, desgaste de la herramienta y la expansión térmica. También es importante, el estudio del efecto combinado de los factores anteriormente mencionados, a fin entender mejor los fenómenos de micromecanizado.

Para mejorar la uniformidad y consistencia de los productos, es necesario explorar las diferencias en cuanto al procesamiento de diferentes materiales de la pieza de trabajo, incluyendo aleaciones metálicas, materiales compuestos, plásticos y cerámicas.

Es importante señalar basándose en toda la información recabada, que la microfabricación requiere de una amplia investigación en los procesos de arranque de viruta, específicamente en aspectos como predicciones de la fuerza de corte, manipulación, montaje, propiedades de los materiales, modelos y pruebas; esto con el fin de definir la verdadera ventaja en función de la aplicación y productividad de este tipo de procesos. Además, la extensa comercialización de la tecnología de microingeniería depende del bajo costo, tiempo de ciclo rápido y alta precisión.

El desarrollo de tecnologías de micromecanizado que logren alcanzar el éxito en el mercado, proporcionará un catalizador para el desarrollo más amplio de los sistemas de microingeniería. La investigación de los procesos de micromecanizado es relativamente nueva y se requiere de muchos más estudios para responder a sus muchas preguntas desafiantes.

Referencias

- Amigo V, Salvador M, Sahuquillo O, 2000, Micro engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 52, pp. 635–657.
- Bang Y, Lee K, Oh S, 2004, 5-Axis micro milling machine for machining micro parts, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, pp.116-124.
- Corral P, Briones L, Galdames J, Muñoz H, 2002, Uso de herramientas de cerámica en el mecanizado de piezas endurecidas térmicamente. *Ciencias e Ingeniería*, Vol. 23, No. 3, pp. 7-12.
- Chae J, Park S, Freiheit T, 2006, Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 313–332.
- García G, 2011, Un proceso general de diseño en ingeniería mecánica. Retrieved 03/13, 2013, Retrieved from www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingeneinv/article/download/.../20535
- Grum J, Kisin M, 2003, Influence of microstructure on surface integrity in turning-part 2: the influence of a microstructure of the work piece material on cutting forces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 1545–1551.
- Ikawa N, Shimada S, Tanaka H, 1992, Minimum thickness of cut in micromachining, *Nanotechnology*, Vol. 3, pp. 6–9.
- Jun M, 2005, Modeling and Analysis of Micro-End Milling Dynamics, PhD Dissertation, University of Illinois Urbana-Champaign.
- Kim J, Kim D, 1995, Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining, *Journal of materials Processing Technology*, Vol. 49, pp. 387–398.
- Kussul E, Baidyk T, Ruiz-Huerta L, Caballero-Ruiz A, Velasco G, Kasatkina L, 2002, Development of micromachine tool prototypes for microfactories, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, pp. 795–812.
- Lee W, Cheung C, To S, 2002, A micro plasticity analysis of microcutting force variation in ultra-precision diamond turning, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, pp. 170–177.
- Liu X, DeVor R, Kapoor S, Ehman K, 2004, The mechanics of machining at the micro scale: assessment of the current state of the science, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 666–678.
- Lucca D, Seo Y, 1994, Aspects of surface generation in orthogonal ultraprecision machining, *Annals of the CIRP*, Vol. 43, pp. 43–46.
- Masuzawa T, 2000, State of the art of micromachining, *Annals of CIRP*, Vol. 49, No. 2, pp. 473–488.
- Quijano A, 2006, Microtecnologías: Evolución del Diseño, *Anales de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires*, Vol. 34, pp. 49-74.
- Quintana G, Ciurana J, 2011, Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 363–376.
- Rai-Choudhury P, 1997, Micromachining, and Microfabrication. *Handbook of microlithography Institution of Electrical Engineers*, Vol. 2, pp. 69-76.
- Rooks B, 2004, The shrinking sizes in micro manufacturing, *Assembly Automation*, Vol. 24, No. 4, pp. 352–356.
- Socorro P, Hernández P, Monzón M, Marrero M, Ortega F, Benítez A, 2013, Metrological needs assessment in micromanufacturing. *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference*, Zaragoza, , 5.
- Son S, Lim H, Ahn J, 2005, Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,

Vol. 45, pp. 529–535.

Shaw M, 1995, Precision finishing, *Annals of CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 343–348.

Tanaka H, 2001, Development of desktop machining micro-factory, *Riken Review*, Vol. 34, pp. 46–49.

Vogler M, Liu X, Kapoor S, Devor R, Ehmann K, 2002, Development of meso-scale machine tool (mMT) systems, *Society of Manufacturing Engineers*, Vol. 181, pp. 1–9.

Vogler M, Devor R, Kapoor S, 2003, Microstructure-level force prediction model for micro-milling of multi-phase materials, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, pp. 202–209.

Weule H, Huntrup V, Tritschler H, 2001, Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 50, pp. 61–64

Recibido: 04 de diciembre de 2014

Aceptado: 17 de abril de 2015

Noguera Gottberg, María Alejandra: Ingeniero Mecánico, Magíster en Gerencia Empresarial, con formación profesional en implementación de Sistemas de Gestión de la Calidad (ISO 9001) y Salud Ocupacional (OSHAS 18001). Profesora de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes (Venezuela)

