

# Torneado asistido por ultrasonidos para la mejora de la productividad

IK4-IDEKO presenta un proyecto que permitirá optimizar la productividad y eficiencia del torneado de materiales de baja maquinabilidad comunes en mercados como el aeronáutico

El torneado es uno de los procesos de arranque de viruta más extendido en la industria, usado sobre todo para materiales metálicos de naturaleza férrica. Sin embargo, en los últimos años, la aplicación de materiales exóticos como las aleaciones aeronáuticas, ha hecho que las condiciones del torneado se vuelvan más estrictas y se tengan que optimizar las técnicas existentes o desarrollar nuevos procedimientos para su mecanizado. Como ejemplo se tiene que en el sector aeronáutico, las piezas críticas son los compresores y turbinas de motores, compuestas por materiales como aleaciones de titanio y superaleaciones base níquel como el Inconel 718. Estas piezas críticas están compuestas por materiales de baja maquinabilidad y sin embargo están sujetas a fuertes requisitos y reglamentos. Es preciso controlar el proceso para que los costes de producción no se disparen y ofrecer un producto de calidad y competitivo.

La productividad de un proceso se define por la tasa de arranque de material (Material Removal Rate- MMR). La MRR generalmente se expresa como el producto de la velocidad de corte, el avance por vuelta y la profundidad de corte. De esta manera, el incremento de dichas variables conlleva una mayor velocidad en la eliminación de material y, así, una mayor productividad de proceso.

Hay varios factores que limitan el valor máximo de esta tasa de arranque de material. La combinación de la herramienta empleada y el material de la pieza definirán el valor de la velocidad de corte a emplear, limitada principalmente por la vida de la herramienta debido a la generación de desgaste en ésta. La vida de la herramienta, a su vez, definirá la eficiencia de la operación a través del número de cambios no productivos necesarios para llevar a cabo el mecanizado de un componente.

En el caso del avance por vuelta y la profundidad de pasada, dichas variables están ligadas a la generación de cargas mecánicas durante el proceso de mecanizado. Éstas quedan limitadas debido a la generación de deformaciones/distorsiones no deseadas en el componente a mecanizar, a la aparición de vibraciones durante el proceso de corte, a los esfuerzos máximos a soportar por los útiles o a la potencia máxima de la máquina-herramienta.

Una alternativa potencial para mejorar la productividad puede ser la aplicación de conceptos no convencionales de eliminación de material que, en combinación con métodos convencionales, constituirá el concepto de mecanizado híbrido. Este hecho resulta patente en las empresas fabricantes de máqui-

na-herramienta que, cada vez más, apuestan por máquinas híbridas.

Una técnica de torneado avanzado que hoy por hoy no está siendo implantada a nivel industrial por los fabricantes y usuarios de tornos es el torneado asistido por ultrasonidos.

## MECANIZADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS

Una de las técnicas que más ventajas aporta para el mecanizado de materiales difíciles de mecanizar es la combinación de mecanizado convencional con vibraciones de naturaleza ultrasónica, denominado mecanizado asistido por ultrasonidos. De esta forma se consigue disminuir las cargas termo-mecánicas sobre la herramienta, incrementando de manera considerable la vida de la herramienta de corte, así como la calidad de las superficies mecanizadas. Además, gracias a la posibilidad de emplear parámetros de proceso más agresivos, permite mejorar la

Una técnica de torneado avanzado que hoy por hoy no está siendo implantada a nivel industrial por los fabricantes y usuarios de tornos es el torneado asistido por ultrasonidos



**Esquema de los componentes de un motor de un avión**

productividad de los procesos de torneado. Las características del material a tornearse definen la herramienta a emplear y los parámetros de corte a controlar para optimizar el proceso y reducir los costos de producción debidos a herramientas, materiales y tiempos de proceso. Tal y como se ha comentado anteriormente, materiales como aleaciones de titanio o aleaciones termo-resistentes presentan dificultades para su mecanizado, siendo el mecanizado asistido por ultrasonidos una solución de gran interés.

De esta manera, generando oscilaciones de frecuencia ultrasónica en la herramienta, es posible mejorar el comportamiento de los mecanizados. Se pueden generar diferentes modos de vibración para que el movimiento de la punta de la herramienta sea en un eje, de forma transversal o en dos ejes mediante una trayectoria elíptica. Hay estudios que reportan tasas de desgaste de herramienta y valores de acabados superficiales inferiores a los obtenidos mediante técnicas convencionales, además de permitir aumentar de manera significativa las profundidades de pasada, junto con la tasa de eliminación de material, sin obtener un modo de corte frágil. El carácter intermitente del mecanizado asistido por ultrasonidos reduce las cargas sobre la herramienta y con ello las fuerzas de corte generadas, además de permitir la evacuación del calor generado en el proceso, disminuyendo, de esta manera, el riesgo de

desgaste de la herramienta y su efecto negativo sobre la superficie final mecanizada.

Esta técnica consiste en dotar a la herramienta de una vibración de alta frecuencia (20-50kHz) durante el proceso de mecanizado. Las principales ventajas de este método son la reducción del desgaste de la herramienta, la disminución de las fuerzas de corte y la mejora del acabado superficial. Mediante esta técnica se puede abordar una mejora de la productividad de la fabricación de componentes con materiales de difícil maquinabilidad.

Por un lado, dado que la generación de desgaste en la herramienta disminuye, la tasa de arranque puede ser incrementada aumentando la velocidad de corte mientras se mantiene la vida de las herramientas. Por otro lado, debido a la reducción de las fuerzas generadas durante el mecanizado, es posible un incremento de la tasa de arranque de material mediante el empleo de mayores avances por vuelta y profundidades de pasada, manteniendo los esfuerzos mecánicos generados durante el proceso. De esta manera, gracias al empleo de vibraciones de naturaleza ultrasónica en la herramienta de corte, es posible incrementar la tasa de arranque de material en comparación con los procesos de mecanizado convencionales, manteniendo las condiciones de vida de la herramienta, los requerimientos de potencia y herramental. Dicho punto resulta idóneo para incrementar la producción de componentes de motores aeronáuticos,

atendiendo a las predicciones sobre las ventas de aviones en los próximos años.

### MECANIZADO DE ALEACIONES DE DIFÍCIL MAQUINABILIDAD

El mecanizado convencional de aleaciones termo-resistentes en base níquel utilizado en aplicaciones aeroespaciales implica grandes dificultades debido a su gran dureza, a su baja conductividad térmica, a sus elevadas tasas de endurecimiento por deformación plástica y a la gran resistencia mecánica que presentan estos materiales a las altas temperaturas.

Dichos puntos provocan elevadas tasas de desgaste de filos de corte, incluso a velocidades de corte relativamente bajas. Esto hace que el precio y el tiempo de la operación se incrementen y crea defectos en el acabado superficial de la pieza que puede hacer que dicha pieza sea desechada. Las altas exigencias a las que trabajan este tipo de piezas pueden hacer que estos detalles generen el rechazo de la pieza mecanizada, incurriendo en un elevado coste.

Todos estos aspectos han de ser afrontados para la mejora de estos procesos de mecanizado mediante el desarrollo de nuevas técnicas avanzadas, como el mecanizado asistido por ultrasonidos, que ayudan a mecanizar este tipo de materiales de tan creciente demanda.

En trabajos de comparativa entre torneado convencional y vibratorio sobre Inconel 718 con una herramienta de carburo, se observa una mejora en la integridad superficial de las piezas, obteniéndose una menor profundidad para las alteraciones microestructurales y una dureza media de dicha capa considerablemente menor, en torno a un 40%.

Las fuerzas de corte generadas disminuyen considerablemente, obteniéndose reducciones del 70% con respecto a las condiciones convencionales. También se ha analizado el torneado del mismo material con diferentes condiciones de vibración y analizado los resultados obtenidos con ambos métodos. Con el torneado asistido por ultrasonidos se consigue una reducción del 50% de la rugosidad junto con menores alteraciones de la



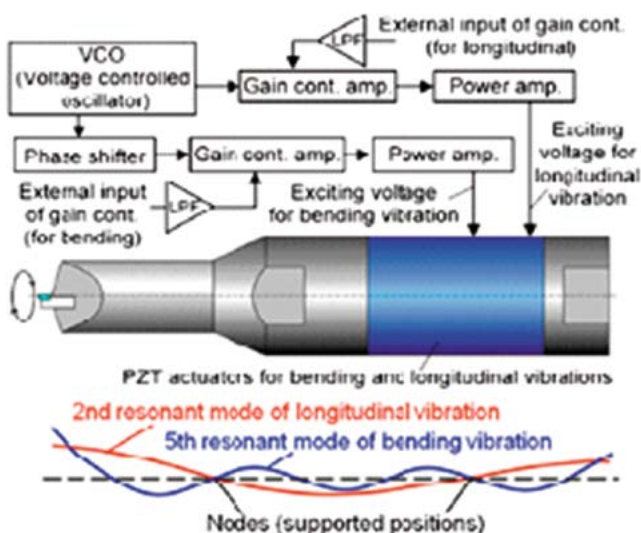
Mecanizado asistido por vibraciones de la herramienta

superficie mecanizada. Los valores de tensiones residuales generadas disminuyen, mientras que la anchura de la capa endurecida es la mitad, con una disminución de dureza del 50% con respecto a la técnica convencional. Por último, se ha observado una reducción significativa para las fuerzas de corte generadas en el caso del torneado asistido por ultrasonidos.

La aleaciones de titanio cada vez están más demandadas en sectores como el aeronáutico o energético debido a que presentan propiedades como el bajo peso, la elevada rigidez, el excelente comportamiento ante la fatiga o la resistencia a atmósferas agresivas. Sin embargo, tiene una serie de desventajas desde el punto de vista de la fabricación. Se trata de un material de baja maquinabilidad con técnicas de mecanizado convencionales; elevada rigidez que hace sufrir a la herramienta de corte; baja conductividad térmica y elevada reactividad química con los materiales de las herramientas al aumentar la temperatura.

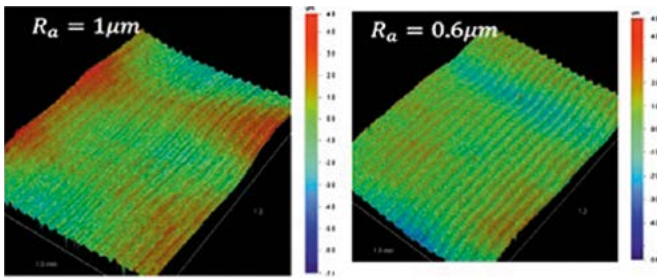
Además, su bajo módulo de Young propicia la aparición de fenómenos de spring-back o chatter que dan lugar a una baja calidad de las superficies finales de las piezas. La composición de la aleación de titanio afecta a su comportamiento y se suelen emplear estabilizadores  $\alpha$  y  $\beta$ . Las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$  de titanio tiene una mayor resistencia mecánica y son el resultado de un tratamiento térmico. Sus características mecánicas se pueden modificar mediante la alteración de su composición.

En el caso de este tipo de aleaciones, el mecanizado asistido por ultrasonidos puede mejorar de manera considerable su procesado. En diversos trabajos realizados, se mecaniza una aleación Ti6Al4V con una herramienta de carburo y se ha observado que es posible mejorar el estado de la superficie mecanizada mediante mecanizado asistido por ultrasonidos; disminuyendo la rugosidad media generada en un 40% y reduciendo la dureza generada en la capa superficial en un 16%. Las fuerzas de corte disminuyen un 60%, mientras que la temperatura máxima se reduce un 25%; disminuyéndose de esta manera la generación de desgaste en la herramienta. Finalmente, se observan menores tensiones residuales en la superficie mecanizada y mejoras en el comportamiento dinámico del proceso de corte. Otro trabajo realizado sobre aleaciones  $\alpha$ - $\beta$  de titanio, en concreto Ti6246 y Ti676-0,9La, consigue aumentar la velocidad de corte del proceso, mejorando la rugosidad y una disminución de



Esquema del sistema de vibración de dos grados de libertad





**Superficies torneadas con mecanizado convencional izquierda, asistido por ultrasonidos derecha**

problema de aumentar la masa móvil y reducir la rigidez del accionamiento.

Otra limitación importante de estos actuadores es que la corriente que absorben es proporcional a la frecuencia de alimentación, con lo que se necesitan amplificadores capaces de generar señales de voltaje de alta potencia de decenas de kHz, para lo que se necesitan equipos específicos y de alto coste. Además, este tipo de accionamientos tiene un problema de fatiga de materiales. Se requieren guiados flexibles que contengan y rigidicen el actuador, y que van a estar sometidos a deformaciones relativamente grandes y con frecuencias de oscilación que exigen resistencia a ciclos infinitos en fatiga, por lo que la selección de materiales y análisis de cargas es crítica. Existen alternativas que parecen basadas en accionamientos electromagnéticos, que a priori tienen ventajas en cuanto a la alimentación eléctrica, pero inconvenientes en rigidez.

A nivel de investigación se proponen soluciones en las que el movimiento ultrasónico no es unidireccional, sino elíptico, lo que mejora las condiciones de mecanizado aún más, pero dificulta el diseño, con mecanismos más complejos y alimentación y control más exigente o costoso. Por ejemplo, en el caso de un sistema de dos grados de libertad, la vibración se consigue mediante la excitación de unos actuadores piezoeléctricos que se encuentran entre dos piezas cilíndricas de metal conductoras. El vibrador está diseñado para tener las mismas frecuencias de resonancia en el segundo modo de vibración longitudinal y en el

**Las principales ventajas de este método son la reducción del desgaste de la herramienta, la disminución de las fuerzas de corte y la mejora del acabado superficial, además mediante esta técnica se puede abordar una mejora de la productividad de la fabricación de componentes con materiales de difícil maquinabilidad**

quinto modo de vibración de flexión, esto genera simultáneamente elevadas vibraciones longitudinales y de flexión mediante la excitación del piezoeléctrico. El valor de la amplitud se define mediante un control externo que mediante la aplicación de un voltaje hace cambiar al actuador. En el caso de un sistema de un grado de libertad el sistema se simplifica notablemente.

## **PROBLEMAS EN EL MECANIZADO DE MATERIALES DE BAJA MAQUINABILIDAD**

Los problemas existentes en el torneado de los materiales de baja maquinabilidad más importantes a analizar para posteriormente evitar se describen a continuación.

### **El desgaste de la herramienta**

La elevada dureza de estos materiales provoca que la vida de la herramienta disminuya rápidamente. Este problema tiene un fuerte impacto en la eficiencia del proceso. Por un lado, el coste de producción se incrementa debido a que constantemente la herramienta ha de ser cambiada, lo cual supone un incremento no sólo en el tiempo de operación sino en el coste herramienta del proceso. Por otro lado, el desgaste del filo de la herramienta genera defectos superficiales que pueden causar el rechazo de la pieza obtenida, obligando a comenzar de nuevo el proceso y generando unos costes adicionales en ocasiones inasumibles por tratarse de piezas de gran valor añadido.

### **Las fuerzas de corte generadas en el torneado**

Estas afectan directamente al comportamiento de la herramienta, generando flexiones de herramienta, pieza o utillaje que provocan distorsiones en el producto final, inadmisibles en sectores como el aeronáutico al trabajar con componentes esbeltos de gran coste. Además, las fuerzas de corte condicionan el tipo de máquina a emplear desde el punto de vista de la potencia necesaria para el mecanizado de determinadas piezas.

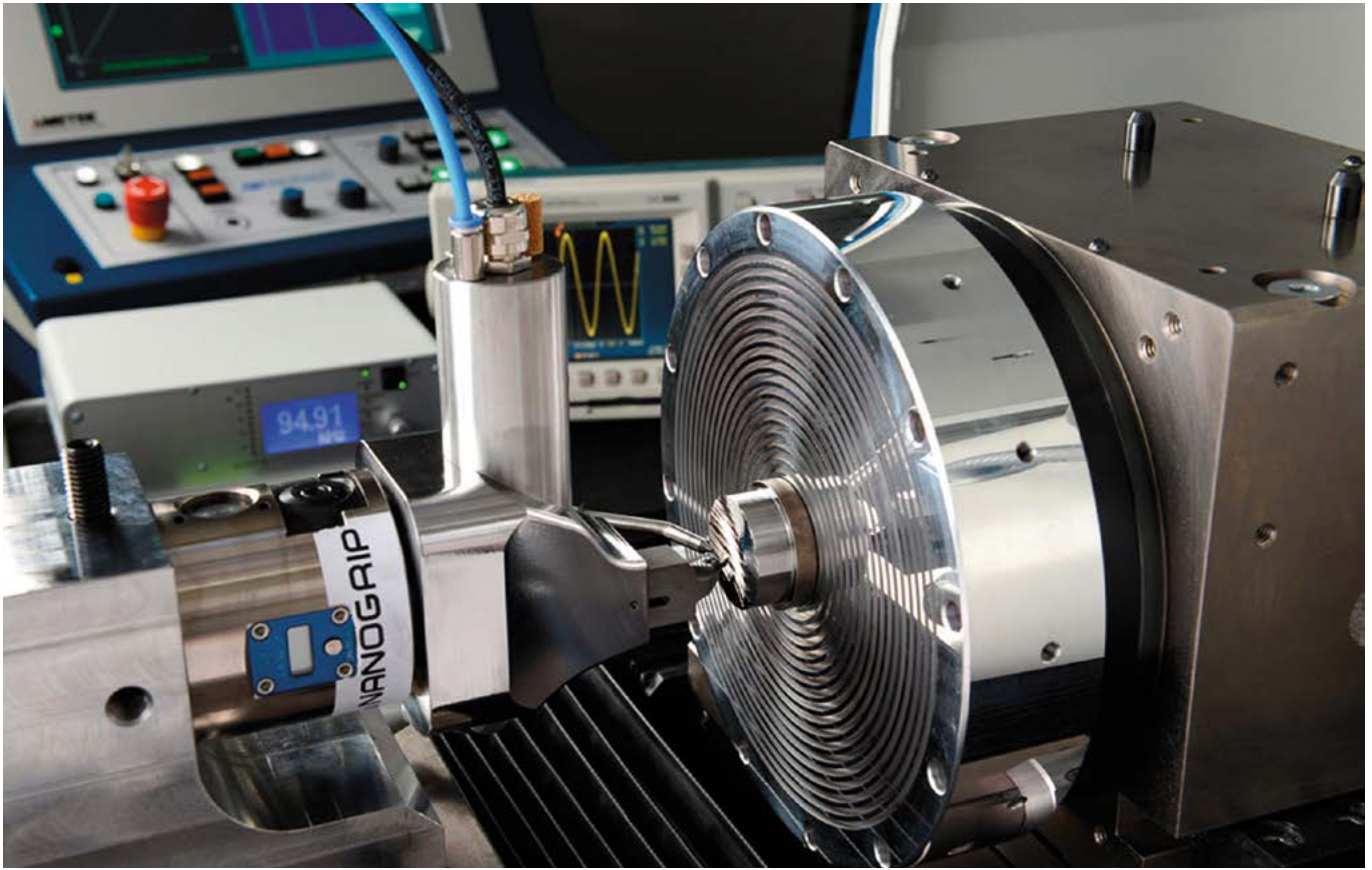
### **La integridad superficial de los componentes mecanizados**

La mayoría de los componentes que hoy en día se fabrican en materiales de baja maquinabilidad muestran requisitos exigentes en cuanto a su vida a fatiga para asegurar un comportamiento robusto a largo plazo. El estado de las superficies mecanizadas muestra un impacto de gran relevancia sobre dicho comportamiento, siendo necesario analizar el efecto de los procesos de torneado sobre la integridad superficial generada en las diferentes piezas objetivo.

Estas dificultades restan eficiencia y rentabilidad al torneado convencional por lo que el desarrollo de técnicas innovadoras que mejoren el proceso son bienvenidas por parte de la industria. El torneado asistido por ultrasonidos es una buena alternativa que aportan mejoras en los aspectos anteriormente mencionados.

## **CONCLUSIONES**

Desde el punto de vista de proceso, este proyecto permitirá optimizar la productividad y eficiencia del torneado de materiales de baja maquinabilidad comunes en mercados como el aero-



**Torneado de ultraprecisión asistido por ultrasonidos**

náutico, gracias a la aplicación de la técnica de torneado asistido por ultrasonidos.

Gracias a los beneficios de esta técnica se pretende incrementar la tasa de arranque de material para conseguir menores tiempos de ciclo sin sacrificar la calidad final de las piezas y mejorando la estabilidad del proceso.

### **EFFECTO EN LA SOSTENIBILIDAD**

Entre los objetivos buscados con el sistema de torneado asistido por ultrasonidos, también se encuentra la búsqueda de la sostenibilidad del proceso y la reducción de su impacto en el medio ambiente. La reducción de la energía consumida durante los procesos de mecanizado, el aumento de vida de plaquitas gracias a la aplicación del torneado asistido por ultrasonidos, así como la disminución de piezas torneadas rechazadas conduce al cumplimiento de este objetivo. El objetivo se traduce en los siguientes aspectos:

- El torneado asistido por ultrasonidos produce una considerable disminución de las fuerzas de corte, lo cual se traduce en una reducción de la potencia de corte necesaria para eliminar un volumen de viruta determinado. Con esta tecnología, se reduce el consumo de potencia requerido por la máquina para la fabricación de un componente dado.
- Una reducción de la relación entre plaquitas consumidas y piezas fabricadas, reduciendo así el número de plaquitas

necesarias y el elevado consumo energético empleado en su fabricación.

- La aplicación del torneado asistido por ultrasonidos permite reducir el uso de refrigerantes, ya sea convencional (taladrina, aceites) o criogénica (nitrógeno líquido o dióxido de carbono). La producción de ambos supone un importante consumo energético y, en el caso de los fluidos convencionales, generación de residuos. Por último, su reciclaje es obligatorio ya que se trata de sustancias muy perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

El aumento de la fiabilidad del proceso de fabricación supone una disminución de piezas rechazadas, reduciendo la cantidad de material residual del proceso o los costes, consumos energéticos, materiales, etc. necesarios para reacondicionar las piezas rechazadas.

Resumiendo, éstas serían las principales ventajas que se podrían alcanzar:

- Reducción de tiempos de mecanizado: 30%
- Reducción del consumo de herramientas: 20%
- Mejora de la calidad superficial de las piezas: 15%
- Reducción del número de piezas rechazadas: 60%
- Reducción de costes asociados al proceso de torneado: 25%.

Grupo de investigación de Procesos de Fabricación  
IK4-IDEKO