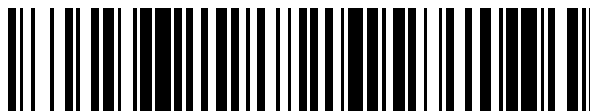


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 711 000**

21 Número de solicitud: 201731254

51 Int. Cl.:

B23Q 17/09 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

24.10.2017

43 Fecha de publicación de la solicitud:

29.04.2019

Fecha de concesión:

03.09.2019

45 Fecha de publicación de la concesión:

10.09.2019

73 Titular/es:

**MONDRAGON GOI ESKOLA POLITEKNIKOA
JOSE MARÍA ARIZMENDIARRIETA, S.COOP.
(100.0%)**

**C/ Loramendi, 4
20500 ARRASATE - MONDRAGON (Gipuzkoa) ES**

72 Inventor/es:

**BADIOLA AIESTARAN, Xabier;
ARRAZOLA ARRIOLA, Pedro José y
ITURROSPE IREGUI, Aitzol**

74 Agente/Representante:

IGARTUA IRIZAR, Ismael

54 Título: **Método para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado en el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo**

57 Resumen:

Método para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado (100) en el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo (10), en donde el sistema de mecanizado (100) es un conjunto formado por una máquina herramienta (20), que comprende al menos un husillo (21) giratorio para girar una herramienta de corte (22) o la pieza de trabajo (10), la pieza de trabajo (10), y el proceso de mecanizado de la pieza de trabajo (10), comprendiendo el método una etapa de excitación de la máquina herramienta (20) que se realiza con el husillo (21) girando. La excitación se realiza mecanizando la pieza de trabajo (10) para obtener los modos de vibración del sistema de mecanizado (100), variando al menos un parámetro de corte C_p del proceso de mecanizado, que genera una variación en las fuerzas de corte F_c sobre la pieza de trabajo (10), de forma controlada.

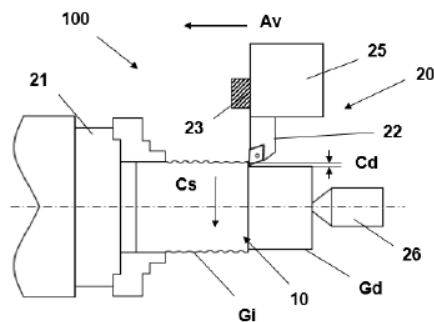


FIG. 2

ES 2 711 000 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

DESCRIPCIÓN

Método para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado en el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo

5

SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente invención se relaciona con métodos para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado en el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo.

10

ESTADO ANTERIOR DE LA TÉCNICA

15 Son conocidos métodos implementados en sistemas de mecanizado, que son conjuntos formados por una máquina herramienta, la pieza de trabajo a mecanizar y el proceso de mecanizado de la pieza de trabajo, cuyo objetivo es reducir las vibraciones producidas en el sistema. Un tipo de métodos son los denominados métodos "on line", porque las medidas correctoras se toman en el momento de detectarse una desviación. En estos métodos, en sucesivos momentos del proceso de mecanizado se detecta la velocidad de giro de un husillo giratorio de una herramienta de corte o de una pieza de trabajo a mecanizar de la máquina herramienta, y también se detecta la aceleración de la vibración existente en el sistema de mecanizado. Se determina si ha variado la velocidad del husillo respecto a la velocidad en una etapa previa, y se determina si un valor máximo de aceleración de la vibración del sistema excede un valor umbral predefinido. En el caso de que se produzca una desviación de la aceleración de la vibración, se realiza una modificación de la velocidad de giro del husillo de giro.

20

25

Se conocen otro tipo de métodos empleados en máquinas herramienta, que permiten obtener los modos de vibración de la máquina herramienta previamente a mecanizar la pieza de trabajo, y de esta forma obtener un proceso de mecanizado estable. En estos métodos se define un diagrama de lóbulos de estabilidad, en donde se definen las profundidades de corte límites para cada velocidad del husillo giratorio, siendo el proceso de

30

mecanizado estable. Estos métodos se caracterizan porque se aplica una excitación a la máquina herramienta, con el objeto de obtener la respuesta en frecuencia de dicha máquina herramienta, y con ello definir los modos de vibración de la misma. Siendo conocidos los modos de vibración del sistema, mediante procedimientos conocidos, se puede obtener el
5 diagrama de lóbulos de estabilidad de la máquina herramienta.

Una forma de aplicar la excitación es mediante un impacto realizado con un martillo. En este método, la máquina herramienta está estática, sin mecanizar la pieza de trabajo, y el martillo impacta contra la herramienta de corte.
10

Otra forma de aplicar la excitación en estos métodos de obtención de los modos de vibración de la máquina herramienta, es con un actuador que aplica la excitación en la herramienta de corte de la máquina herramienta, estando dicha máquina herramienta estática o con el husillo giratorio girando, pero sin mecanizar la pieza de trabajo.
15

US2004/0236529A1 describe un dispositivo para obtener la respuesta dinámica de una herramienta de corte situada en una máquina herramienta, ejecutando dicho dispositivo unas etapas para obtener los modos de vibración de la máquina herramienta, comprendiendo las etapas que ejecuta el dispositivo una etapa de excitación de la máquina herramienta que se realiza con el husillo girando, sin mecanizar la pieza de trabajo. El
20 actuador utilizado es un electroimán que induce una fuerza en la herramienta de corte sin contacto, siendo controlada la fuerza mediante la corriente eléctrica suministrada al electroimán.

25 EXPOSICIÓN DE LA INVENCION

El objeto de la invención es el de proporcionar un método para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado en el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo, tal y como se define en las reivindicaciones.
30

En el método de la invención, el sistema de mecanizado es un conjunto formado por una máquina herramienta que comprende al menos un husillo giratorio para girar una herramienta de corte o la pieza de trabajo, la pieza de trabajo y el proceso de mecanizado

de la pieza de trabajo, comprendiendo el método una etapa de excitación de la máquina herramienta que se realiza con el husillo girando. La excitación se realiza mediante el proceso de mecanizado de la pieza de trabajo para obtener los modos de vibración del sistema de mecanizado, variando al menos un parámetro de corte del proceso de mecanizado, que genera una variación en las fuerzas de corte sobre la pieza de trabajo, de forma controlada.

Una ventaja de este método de la invención es que permite obtener los modos de vibración del sistema de mecanizado mientras se realiza el proceso de mecanizado, reduciéndose el tiempo de obtención de dichos modos respecto a métodos conocidos que aplican el impacto con la máquina herramienta estática. Otra ventaja es que se obtienen los modos de vibración del sistema de mecanizado y no solo de la máquina herramienta, de forma que, si posteriormente se obtiene el diagrama de lóbulos de estabilidad, los parámetros de profundidad de corte y velocidades del husillo giratorio relacionadas serán más precisos. Otra ventaja añadida es que la implementación del método es sencilla y de bajo coste, porque no es necesario añadir ningún elemento para aplicar la excitación a la máquina herramienta. Es el propio proceso de mecanizado el que produce la excitación.

Estas y otras ventajas y características de la invención se harán evidentes a la vista de las figuras y de la descripción detallada de la invención.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 muestra una representación esquemática del movimiento relativo entre una herramienta de corte y una pieza de trabajo en corte ortogonal, en un proceso de mecanizado de torneado.

La Figura 2 muestra un esquema parcial de una realización de un sistema de mecanizado que comprende una máquina herramienta que es un torno, una pieza de trabajo a mecanizar, y un proceso de mecanizado para mecanizar la pieza de trabajo, que es un proceso de torneado.

La Figura 3 muestra un esquema parcial de una segunda realización de un sistema de mecanizado, que comprende una máquina herramienta que es una fresadora, una pieza de trabajo a mecanizar, y un proceso de mecanizado para mecanizar la pieza de trabajo, que es un proceso de fresado.

5

La Figura 4 muestra parcialmente una pieza de trabajo cilíndrica en donde se indica la geometría original G_o de dicha pieza de trabajo, y la geometría intermedia G_i mecanizada con una forma ondulada.

10 La Figura 5 muestra un esquema de una unidad de control del sistema de mecanizado de la Figura 2.

La Figura 6 muestra un diagrama de lóbulos de estabilidad de un sistema de mecanizado.

15

EXPOSICIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Durante el mecanizado de una pieza de trabajo se busca alcanzar una forma final de la pieza con una geometría específica previamente definida, y que reúna una serie de
20 requisitos, tales como las tolerancias dimensionales y geométricas, y/o la integridad superficial de la pieza. Para obtener esa geometría definitiva con esos requisitos, la estabilidad del proceso de mecanizado es un factor muy importante.

Es conocido el "chatter" como una de las causas que generan inestabilidad de los procesos
25 de corte en el mecanizado, siendo un problema dinámico que se traduce en la aparición de vibraciones, bien de la máquina utilizada en el proceso de mecanizado, bien del conjunto herramienta de corte-portaherramienta-husillo giratorio, bien de la pieza de trabajo, o bien de todo el sistema de mecanizado. El chatter produce un mal acabado superficial de la pieza de trabajo, rotura de la herramienta de corte y desgaste de los componentes del husillo giratorio
30 o de la máquina herramienta, o desgarros de las piezas de trabajo con paredes delgadas.

En particular, se denomina chatter regenerativo a una vibración autoexcitada propia de los procesos de mecanizado en los que el filo de corte de la herramienta de corte pasa por una

superficie previamente mecanizada. Puede encontrarse en procesos de mecanizado como el torneado, fresado, taladrado, mandrinado, etc. provocando que la herramienta de corte vibre. Como resultado, dicha herramienta de corte no deja una superficie lisa, sino que es ondulada. Por ello, el siguiente diente de la herramienta de corte que entra a cortar, en el caso de un proceso de fresado, o en la siguiente pasada de la herramienta de corte, en un proceso de torneado, se encuentra una superficie variable, con lo que la fuerza de corte varía debidos a la ondulación.

Las variaciones de fuerzas producidas excitan modos de vibración de la máquina, del conjunto herramienta-porta-husillo o de la pieza, apareciendo una vibración a dichas frecuencias modales, o frecuencias del modo dominante.

Modo de vibración o modo normal de un sistema oscilatorio, es la frecuencia a la cual la estructura deformable oscilará libre al ser perturbada. Los modos normales son también llamados frecuencias naturales o frecuencias resonantes. Para cada estructura existe un conjunto de estas frecuencias que es único. Cuando la frecuencia de la fuente emisora de ondas que produce la perturbación coincide con la frecuencia natural del resonador (estructura que oscila), se llega a una condición conocida como resonancia, en la cual la estructura tiende a oscilar con una amplitud mayor en las frecuencias naturales.

Si esa vibración no decae lo suficiente entre dos pasadas consecutivas del filo de la herramienta de corte, se amplifica indefinidamente por los sucesivos impactos hasta alcanzar un punto de saturación. Se dice que el proceso se ha vuelto inestable. El chatter regenerativo puede ser de tres tipos diferentes:

- chatter de máquina herramienta,
- chatter de herramienta, o
- chatter de pieza de trabajo a mecanizar.

La excitación de este modo de vibración provoca un movimiento relativo entre la máquina herramienta y la pieza de trabajo.

La Figura 1 muestra una representación esquemática del movimiento relativo entre una herramienta de corte 22 y una pieza de trabajo 10 en corte ortogonal en un proceso de

mecanizado de torneado, en donde la pieza de trabajo 10 está girando, y se arranca viruta 11 de dicha pieza de trabajo 10. La viruta 11 se representa con una sección de viruta definida por su ancho a_c y su longitud a_w . La herramienta de corte 22 como modelo dinámico de un grado de libertad, se puede representar mediante sus parámetros modales m_t , k_t , c_t , 5 que son la masa, la rigidez y el coeficiente de amortiguación, respectivamente. C_s es la velocidad de corte de la pieza de trabajo 10. $X(t)$ es la posición del filo de la herramienta de corte 22, y T es el tiempo que tarda en dar una revolución la pieza de trabajo 10. Θ_d es el retardo de fase entre revoluciones de la pieza de trabajo 10, y caso de aparecer, determina la aparición de chatter en el proceso de torneado. Si no hay retardo de fase, θ_d igual a cero, 10 el espesor de viruta se mantiene constante y el proceso de corte se mantiene estable. Sin embargo, cuando se produce un retardo de fase, θ_d distinto de cero, el espesor de viruta 11 varía constantemente dando como resultado un proceso de corte inestable.

Se definen como parámetros de corte C_p de un proceso de mecanizado con arranque de 15 viruta, como por ejemplo un proceso de torneado o un proceso de fresado:

- Velocidad de corte C_s : que es la velocidad relativa entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte. Más específicamente es la velocidad relativa entre la arista de corte de la herramienta y la superficie a mecanizar de la pieza.
- Avance A_v : que es la longitud recorrida por la herramienta sobre la superficie a 20 mecanizar en la pieza en un tiempo dado.
- Profundidad de corte C_d : que es la distancia que penetra la herramienta en la pieza en cada una de las pasadas del proceso de mecanizado.

Cuando se produce chatter en el proceso de mecanizado, se forman marcas de vibración 25 sobre la superficie de la pieza, que afectan negativamente en la precisión y el acabado superficial de dicha pieza. Debido al chatter se producen variaciones en la fuerza de corte F_c , que es la fuerza que la herramienta de corte realiza sobre la pieza de trabajo, y ello conlleva el provocar daños en la herramienta y reducir su vida útil. El chatter es a menudo un factor limitante en la productividad de la máquina herramienta.

30 El análisis modal es un proceso mediante el cual se describe una estructura o sistema en términos de sus propiedades dinámicas o parámetros modales. Permite comprender cómo se comportan las estructuras bajo la acción de fuerzas dinámicas que producen una

perturbación. Todas las estructuras poseen frecuencias naturales y modos de vibración, que dependen básicamente de la masa y de la rigidez de la estructura. Para identificar las zonas de mecanizado estables, es necesario identificar estas frecuencias y conocer cómo afectan a la respuesta de la estructura cuando las fuerzas de corte actúan sobre la misma. El análisis modal es una herramienta que permite describir, comprender y modelar el comportamiento dinámico de las estructuras o sistemas.

Una estructura alterada de su posición de descanso mediante una excitación tiende a vibrar a las frecuencias naturales o resonantes. Para cada frecuencia natural, la estructura adquiere una determinada forma denominada forma modal. El análisis modal permite calcular las frecuencias naturales y las formas modales asociadas. Se estudia la estructura cuando se encuentra sometida a una excitación conocida, con el objetivo de obtener un modelo matemático del comportamiento dinámico de la estructura. El procedimiento para llevar a cabo el análisis modal experimental consiste en:

15

- excitar el sistema o estructura,
- adquirir y analizar datos, y
- determinar los parámetros modales de la estructura.

20 En un ensayo dinámico se aplica una carga dinámica a la estructura. Dicha carga tiene componentes en un cierto rango de frecuencias y la estructura responde a todas las frecuencias, pero entrará en resonancia cuando las componentes coincidan con las frecuencias naturales de la estructura.

25 La técnica de excitación para el análisis modal más conocida es el impacto, mediante un excitador tipo martillo. En esta técnica, la máquina herramienta está estática, sin mecanizar la pieza de trabajo, y el martillo se impacta contra la herramienta de corte. La duración del impacto es normalmente muy corta en comparación con el tiempo que hay que medir la respuesta.

30

Otra técnica de excitación es la descrita en el documento US2004/0236529A1, en la que un actuador aplica la excitación en la herramienta de corte de la máquina herramienta, sin contacto, pudiendo estar dicha máquina herramienta estática o con el husillo giratorio

girando, pero sin mecanizar la pieza de trabajo.

Sin embargo, estas técnicas de excitación del análisis modal experimental presentan algunas desventajas. Es preciso entender que las vibraciones que producen el chatter se originan cuando la pieza de trabajo se está mecanizando en un sistema de mecanizado. Se define un sistema de mecanizado como un conjunto formado por una máquina herramienta, la pieza de trabajo a mecanizar, y el proceso de mecanizado utilizado para mecanizar la pieza de trabajo, comprendiendo la máquina herramienta al menos un husillo giratorio para girar una herramienta de corte o la pieza de trabajo, dependiendo del proceso de mecanizado llevado a cabo, ya sea un torneado, fresado, etc.

En las técnicas de excitación mencionadas del estado de la técnica, la excitación del sistema se realiza en parado, ya que, aunque el husillo de la herramienta de corte o de la pieza de trabajo esté girando, el sistema de mecanizado no está mecanizando la pieza de trabajo. Por lo tanto, el sistema de mecanizado se encuentra desacoplado, ya que la herramienta de corte no está en contacto con la pieza. El sistema de mecanizado cambia dinámicamente durante el mecanizado debido a que los modos de vibración son diferentes, lo cual puede llevar a conclusiones erróneas.

Se describe a continuación el método de la invención, que permite excitar la máquina herramienta durante el mecanizado de la pieza de trabajo, para obtener los modos de vibración del sistema de mecanizado. La Figura 2 muestra un esquema parcial de una realización de un sistema de mecanizado 100, que comprende una máquina herramienta 20, que en esta realización es un torno, una pieza de trabajo 10 a mecanizar, que en esta realización es un cilindro metálico, y un proceso de mecanizado utilizado para mecanizar la pieza de trabajo 10, que en esta realización es un proceso de torneado. La máquina herramienta 20 comprende en esta realización un husillo giratorio 21 para girar la pieza de trabajo 10, y un contrapunto 26 en donde se apoya la pieza de trabajo 10 en su giro.

La máquina herramienta 20 también comprende una torreta 25 para fijar una herramienta de corte 22 utilizada para mecanizar la pieza de trabajo 10, y un sensor 23 que mide las vibraciones o desplazamientos del sistema de mecanizado 100, como respuesta de dicho sistema de mecanizado 100 a la excitación aplicada, siendo el sensor 23 en esta realización

un acelerómetro, pero pudiendo ser en otras realizaciones del sistema de mecanizado 100 un sensor de desplazamiento óptico o capacitivo. El sensor 23 está fijado en esta realización en la torreta 25 de la herramienta de corte 22.

- 5 La máquina herramienta 20 también comprende un sistema de control 24, que permite la introducción de los parámetros de mecanizado necesarios para mecanizar la pieza de trabajo 10, el control de la evolución del proceso de mecanizado hasta su finalización y obtención de la geometría final G_d deseada de la pieza de trabajo 10, partiendo de una geometría original G_o de dicha pieza de trabajo 10, pero además permite la adquisición y
- 10 análisis de los datos de vibraciones del sistema de mecanizado 100, y la determinación de los parámetros modales de dicho sistema de mecanizado 100.

El método comprende una etapa de excitación de la máquina herramienta 20 que se realiza con el husillo 21 girando, y mecanizando la pieza de trabajo 10 con el proceso de

15 mecanizado de torneado. Con esta excitación se obtienen los modos de vibración del sistema de mecanizado 100, como se describirá más adelante, variando de forma controlada durante el proceso de mecanizado, uno o varios de los parámetros de corte C_p de dicho proceso de mecanizado, como son la profundidad de corte C_d , el avance A_v , o la velocidad de corte V_c . Esta variación de los parámetros de corte C_p genera una variación en

20 las fuerzas de corte F_c sobre la pieza de trabajo 10. En el proceso de torneado de la Figura 1, la pieza de trabajo 10 está girando con una velocidad V_c que en un proceso de torneado es la velocidad de corte, la herramienta de corte 22 avanza con un desplazamiento A_v , y la herramienta de corte 22 penetra en la pieza de trabajo en una distancia que es la profundidad de corte C_d .

25 La Figura 3 muestra un esquema parcial de una segunda realización de un sistema de mecanizado 100, que comprende una máquina herramienta 20, que en esta realización es una fresadora, una pieza de trabajo 10 a mecanizar, que en esta realización es una pieza cúbica de base rectangular metálica, y un proceso de mecanizado utilizado para mecanizar

30 la pieza de trabajo 10, que en esta realización es un proceso de fresado. La máquina herramienta 20 comprende en esta realización un husillo giratorio 21 para girar la herramienta de corte 10 en ambas direcciones, y que también se puede desplazar axialmente. La máquina herramienta 20 también comprende una torreta 25 para fijar la

herramienta de corte 22, y un sensor 23 que mide las vibraciones o desplazamientos del sistema de mecanizado 100, siendo el sensor 23 en esta realización también un acelerómetro. El sensor 23 está fijado en en la torreta 25 de la herramienta de corte 22.

- 5 La máquina herramienta 20 también comprende un sistema de control 24, con las mismas características de introducción de datos, adquisición y análisis de datos relacionados con las vibraciones del sistema 100, y determinación de los parámetros modales de dicho sistema 100, que los descritos para la primera realización del sistema de mecanizado 100.
- 10 Como ya se ha indicado, la excitación del sistema de mecanizado 100 se realiza mediante y durante el mecanizado de la pieza de trabajo 10, de forma que no es necesaria una primera determinación de los modos de vibración del sistema de mecanizado 100, antes de proceder a la mecanización de la pieza de trabajo 10. La pieza de trabajo 10 a mecanizar tiene una geometría original G_0 , que en el caso de la pieza cilíndrica a torneear mostrada en la Figura 2
- 15 comprende una superficie lateral lisa. Previamente a la mecanización de la pieza 10, se define la geometría final o definitiva G_f a obtener, y también una geometría intermedia G_i específica a mecanizar antes de mecanizar la geometría definitiva G_f , pero realizándola en el mismo proceso de mecanizado.
- 20 La definición previa de la geometría intermedia G_i depende de la máquina herramienta 20, en esta realización un torno, pero dependiendo también del tipo de torno utilizado, y del rango de frecuencias F_{ex} que se desee excitar, que tiene que ver con las frecuencias de resonancia o naturales del sistema de mecanizado 100. La excitación del sistema de mecanizado 100 en la que se aplica una carga dinámica, puede ser llevada a cabo al
- 25 generar, mecanizando, la geometría intermedia G_i específica en la pieza de trabajo 10, al eliminar, mecanizando, la geometría intermedia G_i en la pieza de trabajo 10, o bien al generar y después eliminar, mecanizando, la geometría intermedia G_i . Hay que tener en cuenta que la generación de la geometría definitiva G_f de la pieza de trabajo 10 se realiza después de generar la geometría intermedia G_i , y siempre supone la eliminación de esta
- 30 geometría intermedia G_i .

Las frecuencias de excitación F_{ex} a aplicar al sistema de mecanizado 100 mediante el mecanizado de la geometría intermedia G_i específica, está relacionado con dicha geometría

intermedia G_i . Estas frecuencias de excitación F_{ex} se calculan con la fórmula:

$$F_{ex} = \frac{Av_2 * Cs_2}{Av_1 * Cs_1} * f$$

en donde,

- Av_1 es el avance cuando se genera mecanizando la geometría intermedia G_i ,
- 5 - Cs_1 es la velocidad de corte cuando se genera mecanizando la geometría intermedia G_i ,
- f es la frecuencia de oscilación de la herramienta de corte 22 en el eje de profundidad de corte C_d ,
- Av_2 es el avance cuando se elimina mecanizando la geometría intermedia G_i , y
- 10 - Cs_2 es la velocidad de corte cuando se elimina mecanizando la geometría intermedia G_i .

La Figura 4 muestra parcialmente una pieza de trabajo 10 cilíndrica de radio R y longitud L , en donde se indica la geometría original G_o de dicha pieza de trabajo, y la geometría intermedia G_i mecanizada con una forma ondulada. En esta geometría intermedia G_i generada, la forma ondulada está definida por una amplitud a y por un espacio s entre ondas. Con esta forma ondulada de la geometría intermedia G_i se definen unas frecuencias F_{ex} determinadas a aplicar como carga dinámica al sistema de mecanizado 100. El diámetro de la pieza de trabajo 10 va variando a lo largo de su longitud L , y dependiendo de la amplitud a de variación del diámetro de la pieza 10, el espacio s entre cada ondulación, y el avance Av empleado de la herramienta de corte 22, se controla la excitación del sistema de mecanizado 100.

Otra realización de geometría intermedia G_i para excitar el sistema de mecanizado en un proceso de torneado, es una pieza cilíndrica con el eje descentrado. En dicha pieza se genera una variación de la profundidad de corte C_d , y se excita el sistema en función de la velocidad de giro ω de corte C_s de dicha pieza. En esta realización de la geometría intermedia G_i , la frecuencia de excitación F_{ex} está limitada por la velocidad de giro del husillo.

30

Para realizar la excitación con varias frecuencias de excitación F_{ex} , se realiza un barrido de

frecuencias. Para obtener dicho rango de frecuencias de excitación F_{ex} , una forma es variar la frecuencia de oscilación f de la herramienta de corte 22 de forma progresiva a lo largo de la pieza de trabajo 10, al generar, mecanizando, la geometría intermedia G_i en dicha pieza de trabajo 10. De esta forma, la frecuencia de excitación F_{ex} va aumentando a medida que se mecanice la pieza de trabajo 10, cubriendo un rango de frecuencias de excitación F_{ex} específica.

Otra forma de obtener un rango de frecuencias de excitación F_{ex} , es variar la velocidad de corte Cs_2 , que es la velocidad de giro del husillo 21 en el proceso de torneado, mientras se elimina, mecanizando, la geometría intermedia G_i . El incremento progresivo de la velocidad de giro del husillo 21 durante el mecanizado de la pieza de trabajo 10, permite cubrir un amplio rango de frecuencias de excitación F_{ex} . Estas formas de obtención de un rango de frecuencias de excitación F_{ex} puede ser trasladado al proceso de fresado.

Como ya se ha descrito más arriba, la excitación del sistema de mecanizado 100 se realiza mediante y durante el mecanizado de la pieza de trabajo 10, de forma que no es necesaria una primera determinación de los modos de vibración del sistema de mecanizado 100, antes de proceder a la mecanización de la pieza de trabajo 10. Otra forma de realizar la excitación del sistema de mecanizado 100 es mediante un actuador durante el proceso de mecanizado.

Se obtiene un rango de frecuencias de excitación F_{ex} aplicado al sistema de mecanizado 100 variando las fuerzas de corte F_c mediante la variación de al menos un parámetro de corte C_p del proceso de mecanizado de forma controlada. Para ello, se pueden emplear los actuadores, que son por ejemplo los motores de accionamiento, de los ejes de la máquina herramienta 20. Y también se puede emplear un actuador externo, como por ejemplo un actuador piezoeléctrico, para variar las condiciones de corte de forma controlada.

Tras la etapa de excitación en el análisis modal, el método para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado 100 en el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo 10, comprende una etapa de adquisición y análisis de datos, y determinación de los parámetros modales del sistema de mecanizado 100. En esta etapa se captan las vibraciones del sistema de mecanizado 100 con el sensor 23. La unidad de control 24 de la máquina herramienta 20 del sistema de mecanizado 100, tal como se muestra en la Figura

5, recibe las vibraciones captadas por el sensor 23 en una unidad de adquisición de vibraciones 24a, y analiza dichas vibraciones con la ayuda de un programa operativo de una unidad de programas 24e, obteniendo la respuesta en frecuencia del sistema de mecanizado 100, y con ello define los modos de vibración de dicho sistema de mecanizado 100, definiendo la Función de Respuesta en Frecuencia FRF como respuesta en frecuencia a la excitación aplicada al sistema de mecanizado 100, en una unidad de análisis de estabilidad 24c. Estas informaciones obtenidas son guardadas en una memoria 24b de la unidad de control 24.

10 La respuesta de la estructura o sistema de mecanizado 100 es una superposición lineal de todos los modos de vibración excitados en el sistema de mecanizado 100. Una propiedad importante de los modos de vibración es que cualquier respuesta de la estructura puede ser expresada como una combinación de una serie de modos de vibración. El espectro de frecuencia de la respuesta de un sistema mecánico presenta tantos picos como grados de libertad posea el sistema. Por ejemplo, podemos considerar que el proceso de torneado es un sistema que presenta un pico en el espectro de frecuencia de la respuesta. Cada pico de la respuesta de una estructura puede ser representado por un modelo físico de un grado de libertad. Dicho modelo físico consiste en una masa puntual, sostenida por un muelle sin masa y conectada con un amortiguador viscoso. Para una estructura cuyo comportamiento es lineal e invariante en el tiempo, la ecuación que define su movimiento es:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}$$

donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son los parámetros modales del sistema 100, y están formados por matrices $N \times N$ de masa, de amortiguamiento y de rigidez del sistema, y $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ y $\{f(t)\}$ son vectores $N \times 1$ que representan la aceleración, la velocidad, el desplazamiento y la fuerza de excitación en cada uno de sus N grados de libertad. La unidad de control 24 calcula dichos parámetros modales del sistema de mecanizado 100, teniendo en cuenta que las frecuencias naturales f_n de un sistema mecánico, y por tanto sus modos de vibración, están relacionadas con la rigidez K y la masa m con la fórmula:

30

$$f_n = (k/m)^{1/2}$$

Tras la etapa de adquisición y análisis de datos, y determinación de los parámetros modales del sistema de mecanizado 100, y una vez obtenidos los modos de vibración de dicho sistema 100, definiendo con estos modos de vibración la Función de Respuesta en Frecuencia FRF como respuesta en frecuencia a la excitación aplicada al sistema de mecanizado 100, el método para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado 100 comprende una etapa de definición del diagrama de lóbulos de estabilidad 30 del sistema de mecanizado 100. Esto es, conocido el comportamiento dinámico de la máquina herramienta 20 y conocida la constante de corte de la máquina herramienta 20, que está relacionada con el material de la herramienta de corte 22, se obtiene el diagrama de lóbulos de estabilidad 30, tal como se muestra en la Figura 6.

Los diagramas de lóbulos de estabilidad se emplean para identificar zonas de mecanizado estables. El diagrama de lóbulos de estabilidad varía en función de la máquina herramienta empleada, de la pieza de trabajo a mecanizar, y de la herramienta de corte utilizada en el proceso de mecanizado. Este diagrama 30 se obtiene en la unidad de control 24 en la unidad de análisis de estabilidad 24c, con los datos del análisis y cálculo de los parámetros modales y modos de vibración realizados anteriormente, y con la ayuda de un programa operativo de la unidad de programas 24e. Estas informaciones obtenidas son guardadas en una memoria 24b de la unidad de control 24. El diagrama de lóbulos de estabilidad 30 del sistema de mecanizado 100 obtenido, separa una zona estable y una zona inestable del proceso de mecanizado de dicho sistema 100, definiéndose las profundidades de corte límite C_d para cada velocidad S_s del husillo giratorio 21 de la máquina herramienta 20, en la zona estable del proceso de mecanizado.

25

REIVINDICACIONES

1. Método para obtener los modos de vibración de un sistema de mecanizado (100) en el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo (10), en donde el sistema de mecanizado (100) es un conjunto formado por una máquina herramienta (20), que comprende al menos un husillo (21) giratorio para girar una herramienta de corte (22) o la pieza de trabajo (10), la pieza de trabajo (10), y el proceso de mecanizado de la pieza de trabajo (10), comprendiendo el método una etapa de excitación de la máquina herramienta (20) que se realiza con el husillo (21) girando, **caracterizado porque** la excitación se realiza mediante el mecanizado de la pieza de trabajo (10) para obtener los modos de vibración del sistema de mecanizado (100), variando al menos un parámetro de corte C_p del proceso de mecanizado, que genera una variación en las fuerzas de corte F_c sobre la pieza de trabajo (10), de forma controlada.
2. Método según la reivindicación 1, en donde el parámetro de corte es la profundidad de corte C_d , el avance A_v , o la velocidad de corte C_s .
3. Método según la reivindicación 1 o 2, en donde la excitación del sistema de mecanizado (100) se realiza mediante el mecanizado en la pieza de trabajo (10) de una geometría intermedia G_i específica definida previamente, obteniéndose un rango de frecuencias de excitación F_{ex} aplicado al sistema de mecanizado (100) específica, relacionado con la geometría intermedia G_i definida.
4. Método según la reivindicación 3, en donde la definición de la geometría intermedia G_i depende de la máquina herramienta (20) y el rango de frecuencias F_{ex} que se desee excitar.
5. Método según la reivindicación 3 o 4, en donde la excitación del sistema de mecanizado (100) se lleva a cabo al generar mecanizando la geometría intermedia G_i en la pieza de trabajo (10) y/o al eliminar mecanizando la geometría intermedia G_i en la pieza de trabajo (10).
6. Método según la reivindicación 5, en donde las frecuencias de excitación F_{ex} se calculan

con la fórmula:

$$F_{ex} = \frac{Av_2 * Cs_2}{Av_1 * Cs_1} * f$$

en donde,

- 5 - Av1 es el avance cuando se genera mecanizando la geometría intermedia Gi,
 - Cs1 es la velocidad de corte cuando se genera mecanizando la geometría intermedia Gi,
 - f es la frecuencia de oscilación de la herramienta de corte (22) en el eje de profundidad de corte Cd,
- 10 - Av2 es el avance cuando se elimina mecanizando la geometría intermedia Gi, y
 - Cs2 es la velocidad de corte cuando se elimina mecanizando la geometría intermedia Gi.
7. Método según la reivindicación 6, en donde se obtiene un rango de frecuencias de
 15 excitación Fex variando la frecuencia de oscilación f de la herramienta de corte (22) al generar mecanizando la geometría intermedia Gi en la pieza de trabajo (10).
8. Método según la reivindicación 6, en donde se obtiene un rango de frecuencias de
 20 excitación Fex variando la velocidad de corte Cs2 mientras se elimina mecanizando la geometría intermedia Gi.
9. Método según la reivindicación 1 o 2, en donde la excitación del sistema de mecanizado
 (100) se realiza mediante un actuador, obteniéndose un rango de frecuencias de
 25 excitación Fex aplicado al sistema de mecanizado (100) relacionado con la variación de al menos un parámetro de corte Cp del proceso de mecanizado de forma controlada.
10. Método según la reivindicación 9, en donde el actuador es el actuador de cada eje de accionamiento de la máquina herramienta (20).
- 30 11. Método según la reivindicación 9, en donde el actuador es externo.

12. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en donde la medición de las vibraciones o desplazamientos del sistema de mecanizado (100) como respuesta de dicho sistema de mecanizado (100) a la excitación aplicada, se realiza con al menos un sensor (23).

5

13. Método según la reivindicación 12, en donde el sensor (23) es un sensor de desplazamiento óptico o capacitivo, o es un acelerómetro.

14. Método según la reivindicación 12 o 13, que comprende:

- 10
- una etapa de adquisición y análisis de datos, y determinación de los parámetros modales del sistema de mecanizado (100), tras la etapa de excitación, en donde se captan las vibraciones del sistema de mecanizado (100) con el sensor (23), comprendiendo la máquina herramienta (20) una unidad de control (24) que analiza las vibraciones y calcula los parámetros modales M, C y K del sistema de
- 15
- una etapa de definición del diagrama de lóbulos de estabilidad del sistema de mecanizado (100), tras la etapa de adquisición y análisis de datos, y determinación de los parámetros modales del sistema de mecanizado (100), en donde la unidad de control (24), a partir de los parámetros modales M, C y K, define el diagrama de lóbulos de estabilidad (30) que separa una zona estable y una zona inestable del proceso de mecanizado, definiéndose profundidades de corte C_d para diferentes velocidades S_s del husillo giratorio (21) en la zona estable del proceso de mecanizado.
- 20

25

15. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, en donde el proceso de mecanizado de la pieza de trabajo (10) es un proceso de mecanizado de arranque de viruta.

30

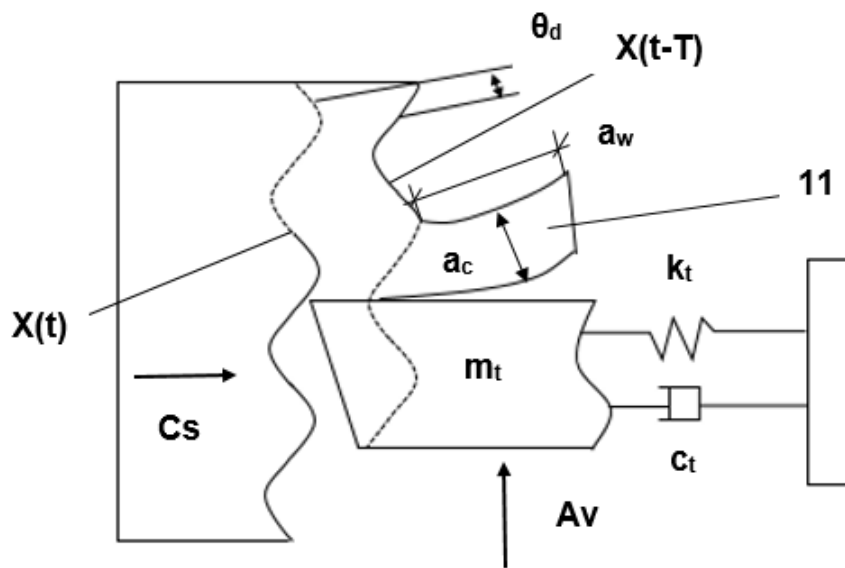


FIG. 1

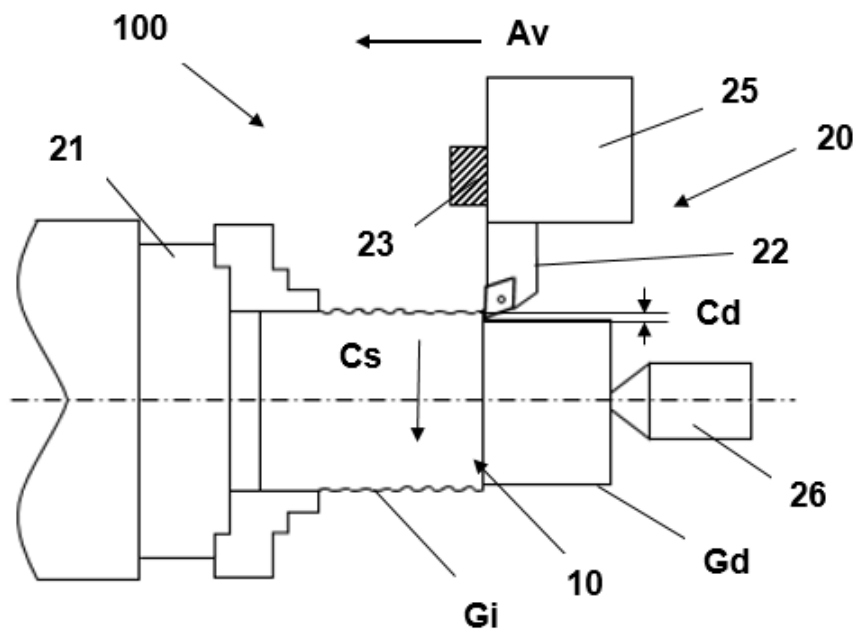


FIG. 2

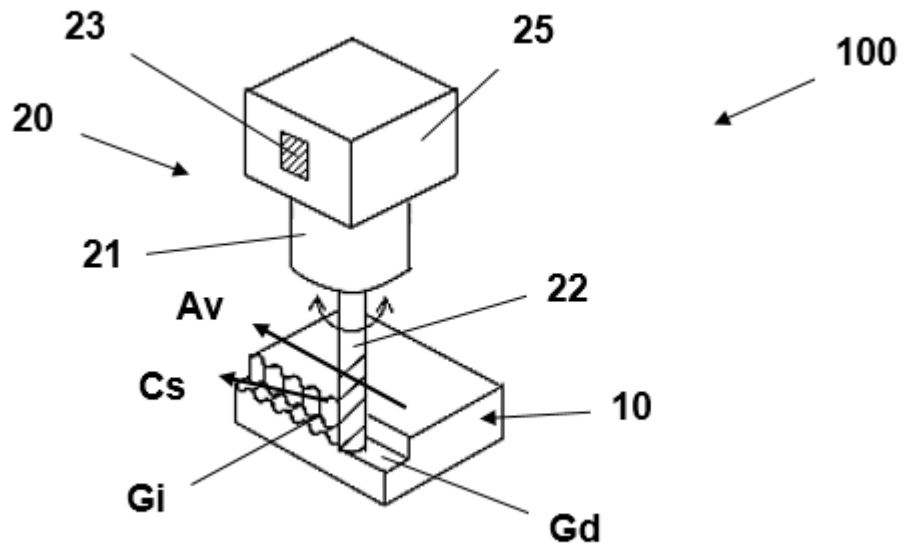


FIG. 3

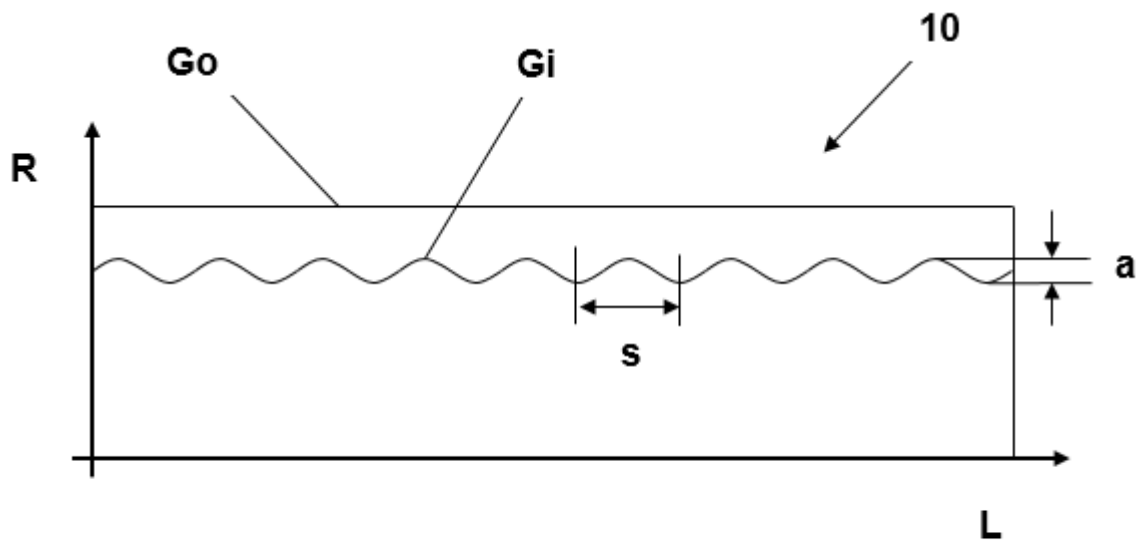


FIG. 4

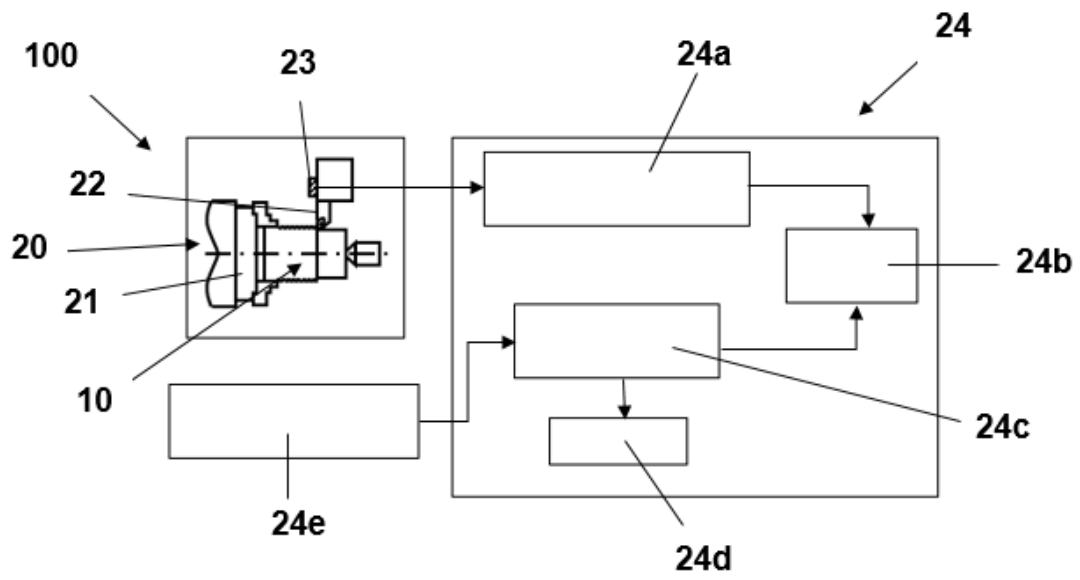


FIG. 5

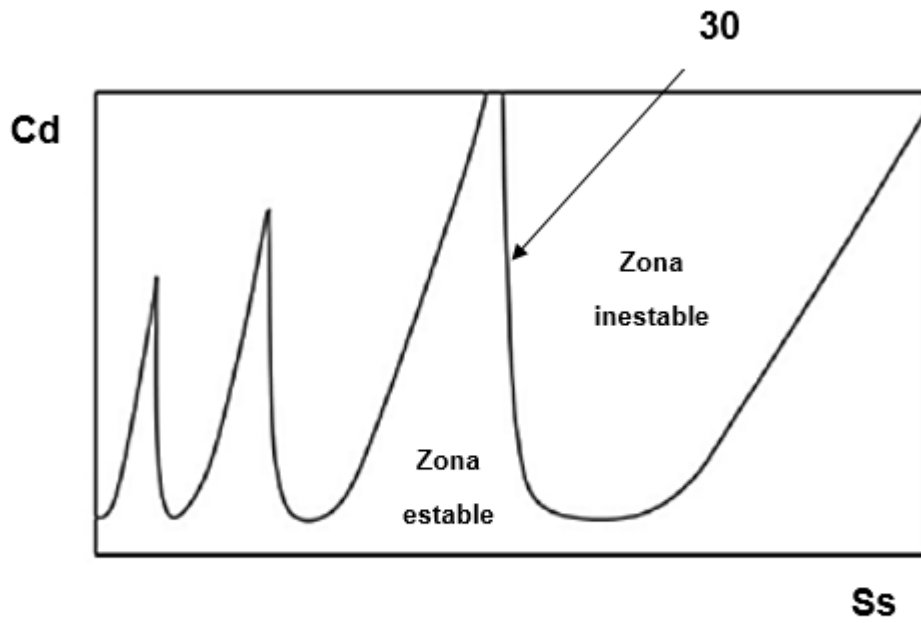


FIG. 6