(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 916 424**

(51) Int. CI.:

***B23B 27/00*** (2006.01)
***F16F 7/104*** (2006.01)
***B23Q 11/00*** (2006.01)
*B82Y 30/00* (2011.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.02.2018 PCT/SE2018/050192**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **06.09.2019 WO19168448**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.02.2018 E 18708771 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.04.2022 EP 3758873**

(54) Título: **Herramienta de corte con amortiguador de masa**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
**01.07.2022**

(73) Titular/es:

**MAQ AB (100.0%)**
**Stenhuggarvägen 1**
**132 38 Saltsjö-Boo, SE**

(72) Inventor/es:

**FU, QILIN;**
**NICOLESCU, CORNEL-MIHAI y**
**RASHID, AMIR**

(74) Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Herramienta de corte con amortiguador de masa

Campo técnico

La presente divulgación se refiere en general a una herramienta de corte que comprende un amortiguador de masa.

Antecedentes técnicos

Las herramientas de corte generalmente se implementan como estructuras en voladizo y su rigidez disminuye sustancialmente con una mayor relación entre la longitud del voladizo y el diámetro. Cuando se mecaniza una pieza de metal con una herramienta de corte, el corte genera fuerzas periódicas en la herramienta de corte y surgen vibraciones. Las vibraciones de la herramienta de corte durante un proceso de maquinado son indeseables por varias razones. La superficie de la pieza de trabajo puede destruirse, la herramienta de corte puede romperse, el proceso de mecanizado puede fallar, etc.

Una solución conocida para suprimir las vibraciones de las herramientas de corte es proporcionar un amortiguador de masa sintonizado que comprenda una masa amortiguadora de modo que la energía de vibración de la herramienta de corte se transmita a la masa amortiguadora añadida. De este modo, la masa amortiguadora añadida vibra en lugar de la herramienta de corte y la herramienta de corte puede mantenerse estable durante el funcionamiento.

Para que los amortiguadores de masa funcionen de manera eficiente, es importante hacer coincidir la frecuencia de resonancia del amortiguador de masa con la frecuencia de vibración de la herramienta de corte en vibración. Para este propósito, algunos amortiguadores de masa de herramientas de corte están provistos de un mecanismo de sintonización para ajustar o sintonizar la frecuencia de resonancia del amortiguador de masa. Además, algunas herramientas de corte de la técnica anterior están provistas de partes mecatrónicas complejas para medir la frecuencia de vibración de la herramienta de corte y para ajustar la rigidez de un elemento de resorte en respuesta a la frecuencia de vibración medida.

El documento US 3447402 A describe un conjunto de cuerpo de barra de perforación de máquina herramienta. El conjunto comprende un cuerpo de barra de perforación circular que tiene un orificio central, elementos absorbentes viscoelásticos en forma de anillo, una masa amortiguadora cilíndrica y un mecanismo de sintonización.

El documento US 2016067787 A1 describe una barra de perforación para operaciones de mecanizado. La barra perforadora tiene una cámara interna dentro de la cual una masa amortiguadora de vibraciones está soportada en cada extremo axial por miembros elásticos amortiguadores. Un pistón de ajuste de vibración se puede mover linealmente con el portaherramientas y tiene un acoplamiento de ajuste de amortiguación con la masa.

El documento US 3643546 describe una herramienta de corte que tiene las características del preámbulo de la reivindicación independiente 1.

El proceso de ajuste requerido para las herramientas de corte de la técnica anterior es complicado para los usuarios finales. Además, un ajuste erróneo puede provocar daños costosos de la herramienta y/o la pieza de trabajo durante el mecanizado. Llamar a un técnico de servicio profesional para realizar la sintonización correcta es costoso para la mayoría de los usuarios finales.

Breve descripción de la invención

Un objeto de la presente descripción es proporcionar una herramienta de corte con un amortiguador de masa que proporciona una auto-sintonización automática.

Otro objeto de la presente descripción es proporcionar una herramienta de corte con un amortiguador de masa que proporcione una amortiguación de vibraciones fiable y eficaz a lo largo del tiempo.

Otro objeto adicional de la presente descripción es proporcionar una herramienta de corte con un amortiguador de masa que permita el uso de una masa de amortiguamiento que tenga un volumen relativamente grande (en relación con la herramienta de corte) y/o el uso de una herramienta de corte relativamente compacta y rígida.

Otro objeto adicional de la presente descripción es proporcionar una herramienta de corte con un amortiguador de masa que tenga una construcción simple, barata y/o fiable.

Según la invención, se proporciona una herramienta de corte según la reivindicación independiente 1. Una herramienta de corte de este tipo comprende un cuerpo de herramienta y un amortiguador de masa, comprendiendo el amortiguador de masa al menos una masa de amortiguamiento; y al menos un elemento de resorte dispuesto para soportar la masa de amortiguamiento, donde el elemento de resorte comprende un material de nanoestructuras con un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión.

A lo largo de la presente descripción, el tamaño estructural de la nanoestructura se puede denominar alternativamente tamaño de grano. La nanoestructura del elemento de resorte que tiene un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión proporciona una rigidez que depende de la frecuencia vibratoria del elemento de resorte. De este modo, se puede realizar una función de auto-sintonización en el amortiguador de masa. El amortiguador de masa constituye así un amortiguador de masa auto-sintonizable.

Una amplia gama de materiales puede tener un material de nanoestructuras con un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión. Los ejemplos incluyen materiales poliméricos, resina, como resina termoestable (resina antes de un proceso de curado), nanocelulosa, metal y grafeno. Otros ejemplos de materiales de nanoestructuras con un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión incluyen varios materiales dopados con nanopartículas (por ejemplo, nanopartículas de carbono y similares), nanofibras (por ejemplo, nanotubos de carbono) y nanocopos (por ejemplo, nanocopos de grafeno). Por ejemplo, los polímeros se pueden dopar con estos dopantes. Los materiales de nanoestructuras según la presente descripción pueden o no estar entrecruzados.

A lo largo de la presente descripción, se puede hacer referencia a una nanoestructura como una microestructura de material observada a escala nm (por ejemplo, una mil millonésima parte de un metro), tal como a nivel atómico o molecular. Para los fines de esta invención, el término "nanoestructura" normalmente se refiere a estructuras que tienen una dimensión menor que es superior a aproximadamente 1 nanómetro, pero normalmente sustancialmente inferior a aproximadamente 100 nm. La nanoestructura del elemento de resorte tiene un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión a temperatura ambiente (20 ºC) o a temperaturas ambientales típicas de mecanizado (por ejemplo, 0 ºC a 60 ºC). El material de nanoestructura del elemento de resorte de acuerdo con la presente descripción se puede preparar mediante un enfoque sintético, como mezclar (por ejemplo, adición de nanopartículas en resina termoestable) y combinar (por ejemplo, mezcla de resina termoestable y materiales poliméricos, y luego se calienta para obtener una mezcla bien distribuida de sustancias que no se pueden separar unos de otros), enfoques con patrones de arriba hacia abajo que incluyen la deposición química de vapor (CVD) o la epitaxia de haz molecular (MBE).

En una realización preferida, el material de nanoestructuras del elemento de resorte puede tener un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos dos dimensiones. Alternativamente, o, además, el material de nanoestructuras del elemento de resorte puede tener un tamaño estructural de 40 nm o menos, como 20 nm o menos, en al menos una dimensión, como en dos dimensiones o en tres dimensiones. El elemento de resorte puede estar constituido por una pieza maciza de material de nanoestructuras.

La identificación del tamaño de la nanoestructura se puede realizar mediante un método con microscopio electrónico de barrido, un método con microscopio electrónico de transmisión y un método de difracción de rayos X. El método de difracción de rayos X mide la dispersión del patrón de difracción de rayos X para decidir el tamaño de las partículas.

La masa de amortiguamiento puede estar soportada por el elemento de resorte en solo un extremo o lado de la masa de amortiguamiento y la masa de amortiguamiento puede no estar soportada en un extremo o lado opuesto. Esto puede ser adecuado cuando la masa de amortiguamiento tiene una longitud relativamente corta. La masa de amortiguamiento puede estar soportada por un solo elemento de resorte en un extremo de la masa de amortiguamiento, por ejemplo, por un solo elemento de resorte constituido por una pieza sólida de material de nanoestructuras.

En una realización preferida, el material de nanoestructuras puede ser amorfo. El material de nanoestructuras puede comprender, por ejemplo, múltiples tipos de enlaces débiles, por ejemplo, enlace de Van der Waals. Alternativamente, o, además, la energía de activación del material de nanoestructuras puede estar en la banda de temperatura entre o ºC y 60 ºC. La banda o rango de temperatura entre 0 ºC y 60 ºC puede constituir un rango de temperatura de un entorno de mecanizado típico.

El elemento de resorte se puede conectar a la masa de amortiguamiento mediante una conexión adhesiva, un ajuste de interferencia o un ajuste forzado tal como un ajuste a presión. El material de nanoestructuras del elemento de resorte puede ser autoadhesivo (por ejemplo, comprender o estar constituido por un material pegajoso). En este caso, el material de nanoestructuras puede adherirse a la masa de amortiguamiento sin utilizar ningún adhesivo adicional. En algunas aplicaciones, no es necesario calentar el material de nanoestructuras para proporcionar la conexión adhesiva por medio del propio material de nanoestructuras. Alternativamente, se puede aplicar un adhesivo adicional para proporcionar la conexión adhesiva.

La herramienta de corte puede estar constituida por una herramienta de corte de metal. La herramienta de corte puede denominarse alternativamente herramienta de mecanizado. Los movimientos vibratorios de la masa de amortiguamiento según la presente invención están dominados por vibraciones radiales y torsionales.

La herramienta de corte puede ser estacionaria o giratoria. En cualquier caso, se puede generar una rotación relativa a una pieza de trabajo para mecanizar la pieza de trabajo.

El cuerpo de herramienta puede comprender una cavidad y la masa de amortiguamiento puede estar dispuesta dentro de la cavidad. Alternativamente, la masa de amortiguamiento puede estar dispuesta externamente en una herramienta de

corte.

En otro ejemplo, la herramienta de corte puede comprender múltiples cavidades y una o varias masas de amortiguamiento dispuestas en cada una de las cavidades. Por ejemplo, una herramienta de corte con múltiples insertos de corte (por ejemplo, una herramienta de fresado), la herramienta de corte puede comprender múltiples cavidades ubicadas debajo de cada uno de los insertos de corte, donde se desplazan una o múltiples masas de amortiguamiento.

Cada una de las masas de amortiguamiento y la cavidad pueden tener una forma cónica sustancialmente conforme entre sí. Las formas cónicas de la masa de amortiguamiento y la cavidad pueden estrecharse cada una hacia una base de la herramienta de corte y alejarse de un cabezal de corte de la herramienta de corte. La forma cónica de la masa de amortiguamiento aumenta la rigidez del cuerpo de herramienta ya que los momentos de inercia de flexión en el cuerpo de herramienta aumentan en lugares que tienen una distancia predefinida a un punto de carga de la fuerza de corte.

La sección transversal de la cavidad y la masa de amortiguamiento no se limitan a una forma circular. Por ejemplo, la sección transversal puede tener la forma de un cuadrado.

La herramienta de corte puede comprender además un fluido viscoso que tenga una rigidez dependiente de la frecuencia y el fluido viscoso puede estar dispuesto dentro de la cavidad. El fluido viscoso puede constituir así una parte del amortiguador de masa. El fluido viscoso puede comprender un material de nanoestructuras que tenga un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión, como entre 1 nm y 100 nm, como entre 5 nm y 100 nm, como entre 5 nm y 20 nm. Alternativamente, o, además, el fluido viscoso puede comprender rellenos de tamaño nanométrico.

El material de nanoestructuras del elemento de resorte tiene una rigidez dependiente de la frecuencia, de modo que la frecuencia de resonancia de la masa de amortiguamiento coincide sustancialmente, o coincide, con la frecuencia de vibración del cuerpo de herramienta en un rango de frecuencia de vibración de 200 Hz a 600 Hz. Una coincidencia sustancial en este sentido cubre diferencias entre frecuencias de resonancia y frecuencias de vibración de hasta el 20 %, como hasta el 10 %, como hasta el 5 %, como hasta el 1 %, así como coincidencias perfectas. La rigidez del elemento de resorte puede ser proporcional a la frecuencia de vibración de la herramienta de corte con una potencia de dos.

Breve descripción de los dibujos

Más detalles, ventajas y aspectos de la presente descripción se harán evidentes a partir de las siguientes realizaciones tomadas junto con los dibujos, en los que:

La Fig. 1a: representa esquemáticamente una vista en perspectiva de una herramienta de corte;
La Fig. 1b: representa esquemáticamente una vista en perspectiva en despiece de la herramienta de corte de la Fig. 1a;
La Fig. 2: representa esquemáticamente una vista en sección transversal de otra herramienta de corte;
La Fig. 3: representa esquemáticamente una vista en sección transversal de otra herramienta de corte;
La Fig. 4: representa esquemáticamente una vista en sección transversal de otra herramienta de corte;
La Fig. 5a: representa esquemáticamente un material de nanoestructuras que tiene una nanoestructura en tres dimensiones;
La Fig. 5b: representa esquemáticamente un material de nanoestructuras que tiene una nanoestructura en dos dimensiones;
La Fig. 6a: representa esquemáticamente una masa de amortiguamiento que comprende una masa de amortiguamiento soportada por dos elementos de resorte; y
La Fig. 6b: representa esquemáticamente una masa de amortiguamiento que comprende una masa de amortiguamiento soportada por un único elemento de resorte.

Descripción detallada

A continuación, se describirá una herramienta de corte que comprende un amortiguador de masa. Se utilizarán los mismos números de referencia para indicar características estructurales iguales o similares.

La Fig. 1a representa esquemáticamente una vista en perspectiva de una herramienta de corte 10 y la Fig. 1b representa esquemáticamente una vista en perspectiva en despiece de la herramienta de corte 10 en la Fig. 1a. Con referencia colectiva a las Fig. 1a y 1b, la herramienta de corte 10 comprende un cuerpo de herramienta 12 que tiene una cavidad 14, un cabezal de corte 16 que sostiene un cortador 18 y un adaptador 20. El adaptador 20 sirve para conectar rígidamente el cabezal de corte 16 al cuerpo de herramienta 12. El adaptador 20 comprende además canales de refrigerante (no indicados) para suministrar refrigerante hacia y desde el cabezal de corte 16. La herramienta de corte 10 comprende además un amortiguador de masa 22. El amortiguador de masa 22 de esta realización de la invención comprende una masa de amortiguamiento 24 y un elemento de resorte 26 para soportar la masa de amortiguamiento 24. La masa de amortiguamiento 24 puede estar hecha, por ejemplo, de material de tungsteno. En la herramienta de corte de las Fig. 1a y 1b, la masa de amortiguamiento 24 está configurada para estar dispuesta dentro de la cavidad 14 del cuerpo de herramienta 12. La masa de amortiguamiento 24 está apoyada de forma desplazable con respecto al cuerpo de herramienta 12 por medio del elemento de resorte 26. La masa de amortiguamiento 24 puede desplazarse radialmente y/o rotatoriamente (con respecto a un eje longitudinal de la herramienta de corte 10) dentro de la cavidad 14 contra la

deformación del elemento de resorte 26. El elemento de resorte 26 comprende un material de nanoestructuras con un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión. En esta herramienta de corte, el elemento de resorte 26 se mantiene entre la masa de amortiguamiento 24 y el adaptador 20. Además, el elemento de resorte 26 de esta herramienta de corte es autoadhesivo y por lo tanto se adhiere a la masa de amortiguamiento 24 y al adaptador 20. La masa de amortiguamiento 24 se puede conectar alternativamente con el exterior del cuerpo de herramienta 12 por medio del elemento de resorte 26.

En esta realización de la invención, el elemento de resorte 26 es anular y sustancialmente plano, por ejemplo, el diámetro del elemento de resorte 26 es al menos 30 veces el grosor del elemento de resorte 26. Sin embargo, son posibles formas alternativas del elemento de resorte 26, incluidas formas simétricas, por ejemplo, forma de junta tórica, formas asimétricas, por ejemplo, que tiene extensiones variables en direcciones radiales, y elementos de resorte 26 que comprenden un material amorfo de nanoestructuras. El grosor del elemento de resorte 26 puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 1 mm.

El elemento de resorte 26 constituye el único soporte de la masa de amortiguamiento 24 con respecto al cuerpo de herramienta 12. Por lo tanto, la masa de amortiguamiento 24 no está soportada en el extremo derecho de la Fig. 1b. En esta herramienta de corte, el elemento de resorte 26 está provisto en el extremo de la masa de amortiguamiento 24 que mira hacia el cabezal de corte 16. Sin embargo, el elemento de resorte 26 se puede proporcionar alternativamente en el extremo opuesto de la masa de amortiguamiento 24.

En las herramientas de corte de la técnica anterior, la masa suele estar soportada en ambos extremos por un elemento de resorte, como en la barra perforadora de US 2016067787 A1. Debido a la necesidad del mecanismo de sintonización, la masa necesita al menos dos elementos de resorte para aislarse del cuerpo de herramienta. Por el contrario, con el amortiguador de masa 22 según la presente descripción, la masa de amortiguamiento 24 puede estar soportada por un elemento de resorte 26 en solo uno de sus extremos ya que se elimina el mecanismo de sintonización.

Al diseñar una herramienta de corte amortiguada 10, la herramienta de corte 10 debería tener una rigidez óptima y un amortiguamiento óptimo. En una herramienta de corte en voladizo típica de la técnica anterior, como la barra de perforación del documento US 2016067787 A1, los objetivos de proporcionar una herramienta de corte más rígida y proporcionar una masa de amortiguamiento más grande están en conflicto. Una masa de amortiguamiento más grande requiere una herramienta de corte más larga y menos rígida.

Sin embargo, una mayor rigidez en el amortiguador de masa 22 según la presente invención reducirá la amplitud de movimiento de la masa de amortiguamiento 24 y evitará la colisión entre la masa de amortiguamiento 24 y el cuerpo de la herramienta 12. Por ejemplo, si el cuerpo de la herramienta 12 tiene un diámetro exterior de 20 mm y una longitud de 200 mm, la longitud de una masa de amortiguamiento de la técnica anterior puede ser de 40 mm.

Al soportar la masa de amortiguamiento 24 desde un solo extremo, se puede ganar un espacio de 4 mm para la masa de amortiguamiento 24 en la dirección axial. Así, con el amortiguador de masa 22 de la herramienta de corte que se muestra en las Fig. 1a y 1b, la masa de amortiguamiento 24 se puede hacer 4 mm más larga, por ejemplo, 10 % más pesada, y los elementos de resorte 26 pueden aumentar la rigidez en un 10 % mientras mantienen la misma frecuencia propia.

Cuando la masa amortiguadora 22 vibra con la misma cantidad de energía, un aumento de la rigidez del 10 % en los elementos de resorte 26 reducirá la amplitud de vibración de la masa de amortiguamiento 24 en un 5 %. La reducción del 5% de la amplitud de vibración de la masa de amortiguamiento 24 reducirá los requisitos sobre el acabado superficial de la cavidad 14 bajo el mismo diseño y, por lo tanto, reducirá los costes de producción.

Además, al soportar la masa de amortiguamiento 24 mediante un elemento de resorte 26 en sólo un extremo de la masa de amortiguamiento 24, ahora queda "libre" un espacio axial dentro de la cavidad 14. Este espacio axial puede ser, por ejemplo, de 4 mm. El volumen de toda la cavidad 14 puede así reducirse, por ejemplo, reduciendo la profundidad axial de la cavidad 14 en 4 mm. De ese modo, se puede aumentar la rigidez del cuerpo de herramienta 12. Con la misma eficacia de amortiguamiento, pero una mayor rigidez en el cuerpo de herramienta 12, la amplitud de vibración de la herramienta de corte 10 se reducirá aún más para beneficiar el proceso de mecanizado.

Una masa de amortiguamiento 24 según las Fig. 1a y 1b puede, sin embargo, comprender alternativamente un elemento de resorte 26 provisto en cada extremo de la masa de amortiguamiento 24, de modo que la masa de amortiguamiento 24 esté soportada por un elemento de resorte 26 en dos extremos. Esto puede ser adecuado cuando la masa de amortiguamiento 24 tiene una longitud relativamente larga.

La Fig. 2 representa esquemáticamente una vista en sección transversal de otra herramienta de corte 10. Principalmente, las diferencias con respecto a las Fig. 1a y 1b se describirán.

La herramienta de corte 10 en la Fig. 2 comprende una masa de amortiguamiento cónica 24 y una cavidad cónica sustancialmente conforme 14. El espacio libre radial entre la masa de amortiguamiento 24 y la cavidad 14 es sustancialmente uniforme. Las formas cónicas de la masa de amortiguamiento 24 y la cavidad 14 se estrechan desde el extremo del cortador (a la izquierda en la Fig. 2) de la herramienta de corte 10, y se estrechan hacia un extremo de soporte

(a la derecha en la Fig. 2) de la herramienta de corte 10. Debido a las formas cónicas de la masa de amortiguamiento 24 y la cavidad 14 del cuerpo de herramienta 12, el cuerpo de herramienta 12 tiene una mayor rigidez en comparación con una carcasa con una masa de amortiguamiento perfectamente cilíndrica y una cavidad perfectamente cilíndrica. La mayor rigidez del cuerpo de la herramienta 12 aumenta la frecuencia de vibración de la herramienta de corte 10 y el amortiguador de masa 22 puede usar una masa de amortiguamiento 24 más pequeña para hacer coincidir la frecuencia propia o la frecuencia de resonancia del amortiguador de masa 22 con la herramienta de corte 10. La mayor rigidez del cuerpo de la herramienta 12 reduce la amplitud de vibración de la herramienta de corte 10, lo que favorece las operaciones de mecanizado. Además, el amortiguador de masa 22 de la Fig. 2 comprende un elemento de resorte 26 en cada extremo de la masa de amortiguamiento 24. Los dos elementos de resorte 26 soportan la masa de amortiguamiento 24 dentro de la cavidad 14 y permiten movimientos radiales y/o giratorios de la masa de amortiguamiento 24 dentro de la cavidad 14.

Además, los elementos de resorte 26 en la Fig. 2 comprenden cada uno un material de nanoestructuras con un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión.

La Fig. 3 representa esquemáticamente una vista en sección transversal de otra herramienta de corte 10. Principalmente, las diferencias con respecto a las Fig. 1a, 1b y 2 se describirán. La herramienta de corte 10 en la Fig. 3 comprende una masa de amortiguamiento cilíndrica 24 soportada en cada extremo por un elemento de resorte 26 que comprende un material de nanoestructuras con un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión.

La cavidad 14 entre la masa de amortiguamiento 24 y el cuerpo de la herramienta 12 se llena con una grasa viscosa o un fluido viscoso 28. Además, el fluido viscoso 28 tiene una rigidez dependiente de la frecuencia. El tamaño de las moléculas y los tipos de enlaces débiles dentro del fluido viscoso 28 contribuirán a determinar la variación de la rigidez en el rango de frecuencia objetivo, normalmente entre 100 Hz y 1000 Hz. El tamaño estructural del fluido viscoso 28 está entre 1 nm y 100 nm, como entre 5 nm y 100 nm, preferiblemente entre 5 nm y 20 nm, para proporcionar la propiedad de rigidez dependiente de la frecuencia. El enlace débil interno del fluido viscoso 28 tiene la forma de un enlace de Van der Waals entre C-H, H-0, H-H, etc. El fluido viscoso 28 puede, alternativamente o, además, contener rellenos de tamaño nanométrico (por ejemplo, partículas, fibras y/o copos) para introducir la nanoestructura y el enlace débil. Ejemplos específicos de los rellenos de partículas incluyen partículas metálicas, partículas cerámicas y partículas poliméricas. También la cavidad cónica 14 en la Fig. 2 puede llenarse con el fluido viscoso 28.

La Fig. 4 representa esquemáticamente una vista en sección transversal de otra herramienta de corte 10. Principalmente, las diferencias con respecto a las Fig. 1a, 1b, 2 y 3 se describirán.

La herramienta de corte 10 de la Fig. 4 comprende una masa de amortiguamiento 24 que está achaflanada en cada extremo. Como alternativa, sólo se puede achaflanar uno de los extremos. Cada sección achaflanada de la masa de amortiguamiento 24 está en contacto con un elemento de resorte 26. La geometría de contacto entre la masa de amortiguamiento 24 y el elemento de resorte 26 no se limita por tanto a una geometría recta y también se puede utilizar una geometría de contacto achaflanada según la Fig. 4.

Las Fig. 5a y 5b representan esquemáticamente un material de nanoestructuras que tiene una nanoestructura en tres dimensiones y dos dimensiones, respectivamente. En la Fig. 5a, el tamaño estructural es de aproximadamente 20 nm en tres dimensiones. En la Fig. 5b, el material de nanoestructuras comprende moléculas de cadena larga con un tamaño estructural inferior a 20 nm en dos dimensiones. En la Fig. 5b, las moléculas de cadena larga están entrelazadas. El grosor de una cadena corresponde al grosor de una molécula.

La mayoría de los materiales de ingeniería tienen una rigidez casi constante en el rango de frecuencia entre 20 Hz y 4000 Hz, como cauchos, elastómeros, aceros y cerámicas. Sin embargo, la rigidez de algunos materiales se vuelve sensible a la temperatura cuando el material experimenta un cambio de fase (por ejemplo, repolimerización y recristalización), como las aleaciones con memoria. El comportamiento sensible de la rigidez del material sobre la temperatura es causado por la transformación de fase donde el tamaño estructural dentro de los materiales se reduce a 100 nm o menos, como a 40 nm o menos, como a 20 nm o menos.

La teoría de la superposición tiempo-temperatura explica que los materiales que tienen una propiedad mecánica sensible a la temperatura también son sensibles a los cambios de frecuencia. Dichos materiales experimentan una disminución de la rigidez cuando la temperatura aumenta y un aumento de la rigidez cuando la temperatura disminuye. Esta propiedad hace que dichos materiales sean una buena elección para uno o más elementos de resorte 26 con el fin de proporcionar un efecto de auto-sintonización del amortiguador de masa 22.

Los materiales viscoelásticos no tienen necesariamente la propiedad de rigidez dependiente de la frecuencia descrita. Los materiales viscoelásticos típicos, como cauchos y elastómeros, tienen un tamaño estructural nominal entre 100 nm y 1000 nm a temperatura ambiente cercana a los 20 ºC y no muestran propiedades mecánicas significativas dependientes de la frecuencia. Los materiales que tienen una nanoestructura donde el tamaño estructural es 100 nm o menos, preferiblemente 40 nm o menos, más preferiblemente 20 nm o menos, en al menos una dimensión, proporcionarán una rigidez mecánica dependiente de la frecuencia. En la herramienta de corte de la invención, el material de nanoestructuras tiene la nanoestructura con un tamaño estructural de 100 nm o menos a temperaturas de entornos de operación de mecanizado industrial (por ejemplo, 0 ºC a 60 ºC) y/o a temperatura ambiente (por ejemplo, aproximadamente 20 ºC).

Cuando la nanoestructura del material tiene una dimensión de 100 nm o menos, como 20 nm o menos, los granos de tamaño nanométrico forman límites de grano masivos con enlaces débiles entre las moléculas. Estos enlaces débiles son sensibles a la temperatura. Un ligero aumento de temperatura proporcionará la energía térmica para superar la energía de activación del enlace en los límites de grano. La teoría de la superposición tiempo-temperatura dice que la disminución de la frecuencia de excitación (aumento del tiempo) tiene el mismo efecto que el aumento de la temperatura.

Un material de nanoestructuras según la presente descripción puede estar constituido por un material amorfo. En dicho material amorfo, la rigidez del material cambia gradualmente en una amplia banda de temperatura, como en un rango de temperatura en un entorno de mecanizado típico. Además, un material de nanoestructura según la presente descripción puede tener una nanoestructura con moléculas de cadena larga (tamaño nanométrico en la sección transversal de la molécula) entrelazadas entre sí. Los ejemplos de dichos materiales incluyen resina termoestable y nanocelulosa. Los materiales de nanoestructuras de acuerdo con la presente descripción, como la resina termoestable, pueden perder el 90% de la rigidez en un rango de temperatura entre 0 ºC y 60 ºC, debido a que existen múltiples tipos de enlaces débiles (enlaces intermoleculares e interatómicos de Van der Waal) que superan la energía de activación a diferentes temperaturas, como enlace Van der Waal de H-H, enlace Van der Waal de H-C, enlace Van der Waal de O-H, etc. El cambio gradual de la rigidez sobre la temperatura refleja, es decir, corresponde, al cambio gradual de la rigidez sobre la frecuencia, es decir, rigidez dependiente de la frecuencia preferida para aplicaciones de amortiguadores de masa auto-sintonizables.

Los cauchos también pueden tener una rigidez dependiente de la temperatura, y la rigidez de los cauchos generalmente varía drásticamente en la banda de temperatura entre -50 ºC y 0 ºC, que está fuera del entorno de operación de mecanizado objetivo. Esto significa que la energía de activación del enlace débil está en la banda de temperatura entre -50 ºC y 0 ºC. Además, el alcance del cambio de rigidez en un rango de frecuencia entre 100 Hz y 1000 Hz para cauchos es demasiado bajo para lograr la función de auto-sintonización.

Además, para estabilizar la propiedad de rigidez de un material en un rango de frecuencia específico, se pueden usar partículas, fibras y/o copos nanoestructurados como relleno y mezclarlos con el material (por ejemplo, con un material de resina termoestable o un material de nanocelulosa). Los ejemplos de tales rellenos incluyen partículas de polímeros nanoestructurados (por ejemplo, polímeros termoplásticos o elastómeros triturados), fibras nanoestructuradas (por ejemplo, nanotubos de carbono) y copos nanoestructurados (por ejemplo, grafeno).

Después de calentarse en un entorno de mecanizado típico, el material de nanoestructuras no cambia necesariamente a una fase fluida. El material de las nanoestructuras puede someterse a un proceso de repolimerización y formar otro compuesto químico que sea estable a temperatura elevada con una propiedad de rigidez diferente. Después de calentarse a una temperatura más alta, por ejemplo, a una temperatura de 120 ºC o más, el proceso de polimerización del material de la nanoestructura puede volverse irreversible y el material de nanoestructuras perderá la propiedad de rigidez dependiente de la frecuencia. Los materiales con una nanoestructura, donde al menos una dimensión es de 100 nm o menos, como 20 nm o menos, tendrán una rigidez dependiente de la frecuencia controlada por la fuerza de enlace en los límites de grano sobre una temperatura de mecanizado típica. El amortiguador de masa 22 que comprende uno o más elementos de resorte 26 que tienen dicho material de nanoestructuras tendrá una función de auto-sintonización ya que la rigidez del elemento de resorte 26 aumenta cuando aumenta la frecuencia de vibración de la herramienta de corte 10. El material de nanoestructuras del elemento de resorte 26 según la presente descripción tiene un tamaño estructural de 100 nm o menos, como 40 nm o menos, como 20 nm o menos, en una dirección, dos direcciones o tres direcciones. El amortiguador de masa 22 según la presente descripción evita por tanto partes mecatrónicas complejas en un portaherramientas de corte que miden la frecuencia de vibración y luego ajustan la rigidez de los elementos de resorte con base en la frecuencia de vibración medida.

Es importante hacer coincidir la frecuencia propia $f_n$ del amortiguador de masa 22 con la frecuencia de vibración $f_t$ de la herramienta de corte 10 para obtener la máxima eficacia de amortiguamiento. La frecuencia propia $f_n$ del amortiguador de masa 22 debe coincidir con la frecuencia de vibración $f_t$ de la herramienta 10, y se puede expresar como:

$$f_n = f_t = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (1)$$

donde k es la rigidez del elemento de resorte 26 y m es la masa de la masa de amortiguamiento 24. La rigidez k del elemento de resorte 26 depende, por ejemplo, de la geometría y el material utilizado.

Cuando la frecuencia de vibración de la herramienta de corte 10 disminuye, la rigidez del elemento de resorte 26 se reducirá. Como consecuencia, la frecuencia propia del amortiguador de masa 22 se reducirá para coincidir con el cambio de frecuencia en la herramienta de corte 10. Por el contrario, cuando aumenta la frecuencia de vibración de la herramienta de corte 10, la rigidez del elemento de resorte 26 aumentará y la frecuencia propia del amortiguador de masa 22 aumentará para coincidir con el cambio de frecuencia en la herramienta de corte 10. Este efecto de auto-sintonización del amortiguador de masa 22 es muy valioso para la industria de las máquinas herramienta, por ejemplo, en los casos en los

que la frecuencia de vibración se desvía con el tiempo y es diferente en diferentes máquinas. La propiedad de auto-sintonización del amortiguador de masa 22 elimina el intrincado proceso de ajuste necesario para las herramientas de corte de la técnica anterior. Al reformular la ecuación (1), la rigidez k del elemento de resorte 26 se puede expresar como:

$$k = m \times (2\pi f_n)^2 = m \times (2\pi f_t)^2 \qquad (2)$$

La masa m de la masa amortiguadora 24 suele ser un término fijo. Por lo tanto, la rigidez del elemento de resorte 26 depende de la frecuencia de vibración $f_t$ de la herramienta de corte 10. La rigidez del elemento de resorte 26 puede cambiar proporcionalmente al cuadrado de la frecuencia de vibración de la herramienta de corte 10. La rigidez dependiente de la frecuencia puede tener lugar en varias bandas de frecuencia. Para herramientas de torneado y fresado, la frecuencia de vibración generalmente cambia entre 100 Hz y 1000 Hz. Por lo tanto, la rigidez del material del elemento de resorte 26 necesita cambiar 100 veces para cubrir el rango completo de cambio de frecuencia. Para aplicaciones de corte de metales, la frecuencia de vibración generalmente cambia menos. Por ejemplo, si la frecuencia de vibración cambia entre 200 Hz y 600 Hz, la rigidez del material del elemento de resorte 26 debe cambiar nueve veces sobre la banda de frecuencia objetivo para realizar una sintonización perfecta.

La Fig. 6a representa esquemáticamente un amortiguador de masa 22 que comprende una masa de amortiguamiento 24 soportada por dos elementos de resorte 26, y la Fig. 6b representa esquemáticamente un amortiguador de masa 22 que comprende una masa de amortiguamiento 24 soportada por solo un elemento de resorte 26.

La rigidez $k_{md1}$ del amortiguador de masa 22 en la Fig. 6a se puede expresar como:

$$k_{md1} = \frac{X}{F} = k_1 + k_1 = 2\frac{G \times A}{t_1} \qquad (3)$$

donde X es la amplitud de desplazamiento de la masa de amortiguamiento 24, F es la fuerza sobre la masa de amortiguamiento 24, G es el módulo de corte de cada elemento de resorte 26, $t_1$ es el grosor de cada elemento de resorte 26, y A es el área de la sección transversal (perpendicular al grosor) de cada elemento de resorte 26.

La rigidez $k_{md2}$ del amortiguador de masa 22 en la Fig. 6b se puede expresar como:

$$k_{md2} = \frac{X}{F} = k_2 = \frac{G \times A}{t_2} \qquad (4)$$

donde X es la amplitud de desplazamiento de la masa de amortiguamiento 24, F es la fuerza sobre la masa de amortiguamiento 24, G es el módulo de corte del elemento de resorte 26, $t_2$ es el grosor del elemento de resorte 26, y A es el área de la sección transversal (perpendicular al grosor) del elemento de resorte 26.

Si la rigidez de los amortiguadores de masa 22 en las Fig. 6a y 6b son iguales, se da a entender que:

$$t_2 = \frac{t_1}{2} \qquad (5)$$

Por lo tanto, al soportar la masa de amortiguamiento 24 en solo un extremo de la masa de amortiguamiento 24, el grosor del elemento de resorte 26 se puede reducir aún más para permitir una masa de amortiguamiento 24 más grande y/o un cuerpo de herramienta 12 más corto (más rígido).

Si bien la presente descripción se ha descrito con referencia a realizaciones ejemplares, se apreciará que la presente invención no se limita a lo que se ha descrito anteriormente. Por ejemplo, se apreciará que las dimensiones de las partes pueden variar según sea necesario. En consecuencia, se pretende que la presente invención esté limitada únicamente por el alcance de las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Una herramienta de corte (10) que comprende:

- un cuerpo de herramienta (12); y
- un amortiguador de masa (22), donde el amortiguador de masa (22) comprende:
- al menos una masa de amortiguamiento (24); y
- al menos un elemento de resorte (26) dispuesto para soportar la masa de amortiguamiento (24);
donde la masa de amortiguamiento (24) está soportada por solo un elemento de resorte (26) en un extremo de la masa de amortiguamiento (24), o la masa de amortiguamiento (24) está soportada por solo un elemento de resorte (26) en cada extremo de la masa de amortiguamiento (24); caracterizada porque

el elemento de resorte (26) comprende un material de nanoestructuras con un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión; y porque el material de nanoestructuras del elemento de resorte (26) tiene una rigidez dependiente de la frecuencia tal que la frecuencia de resonancia de la masa de amortiguamiento (24) coincide sustancialmente con la frecuencia de vibración del cuerpo de herramienta (12) en un rango de frecuencia de vibración de 200 Hz a 600 Hz.

2. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 1, donde el material de nanoestructuras del elemento de resorte (26) tiene un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos dos dimensiones.

3. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 1 ó 2, donde el material de nanoestructuras del elemento de resorte (26) tiene un tamaño estructural de 40 nm o menos, tal como 20 nm o menos, en al menos una dimensión.

4. La herramienta de corte (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el elemento de resorte (26) está constituido por una pieza sólida de material de nanoestructuras.

5. La herramienta de corte (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la masa de amortiguamiento (24) está soportada por el elemento de resorte (26) en un extremo de la masa de amortiguamiento (24) y donde la masa de amortiguamiento (24) no está soportada en un extremo opuesto.

6. La herramienta de corte (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el material de nanoestructuras del elemento de resorte (26) es amorfo.

7. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 6, donde el material de nanoestructuras del elemento de resorte (26) comprende múltiples tipos de enlace débil.

8. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 6 ó 7, donde la energía de activación del material de nanoestructuras se encuentra en la banda de temperatura entre 0 ºC y 60 ºC.

9. La herramienta de corte (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el elemento de resorte (26) está conectado a la masa de amortiguamiento (24) mediante una conexión adhesiva, un ajuste de interferencia o un ajuste forzado.

10. La herramienta de corte (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el cuerpo de herramienta (12) comprende una cavidad (14) y donde la masa de amortiguamiento (24) está dispuesta dentro de la cavidad (14).

11. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 10, donde cada uno de la masa de amortiguamiento (24) y la cavidad (14) tiene una forma cónica sustancialmente conforme entre sí.

12. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 10 u 11, que comprende además un fluido viscoso (28) que tiene una rigidez dependiente de la frecuencia y donde el fluido viscoso (28) está dispuesto dentro de la cavidad (14).

13. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 12, donde el fluido viscoso (28) comprende un material de nanoestructuras que tiene un tamaño estructural de 100 nm o menos en al menos una dimensión, como entre 1 nm y 100 nm, como entre 5 nm y 100 nm, como entre 5 nm y 20 nm.

14. La herramienta de corte (10) según la reivindicación 12 ó 13, donde el fluido viscoso (28) comprende rellenos de tamaño nanométrico.

15. La herramienta de corte (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la rigidez del elemento de resorte (26) es proporcional al cuadrado de la frecuencia de vibración de la herramienta de corte (10).

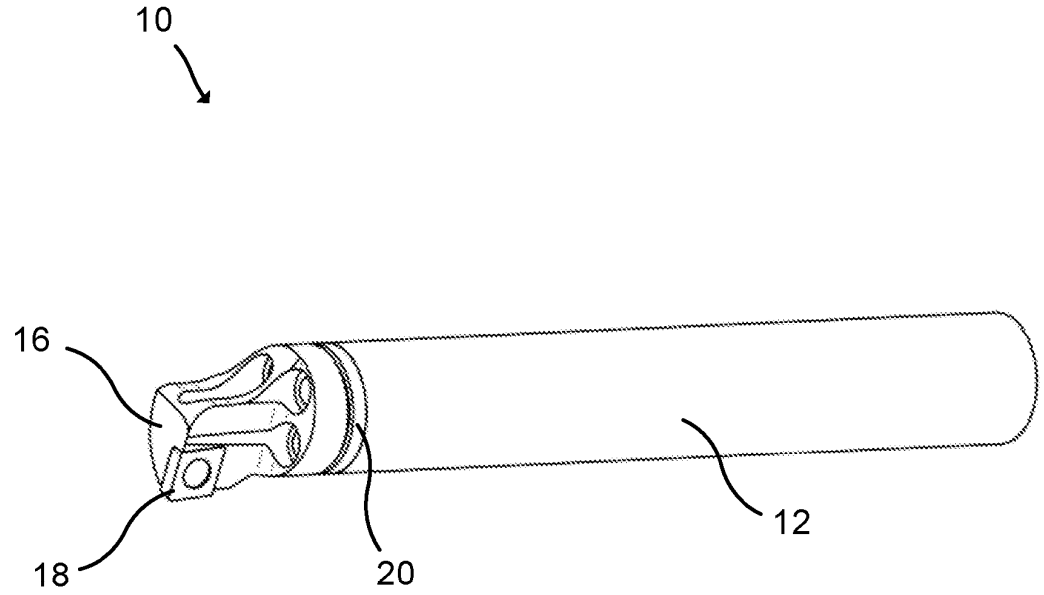



Fig. 1a

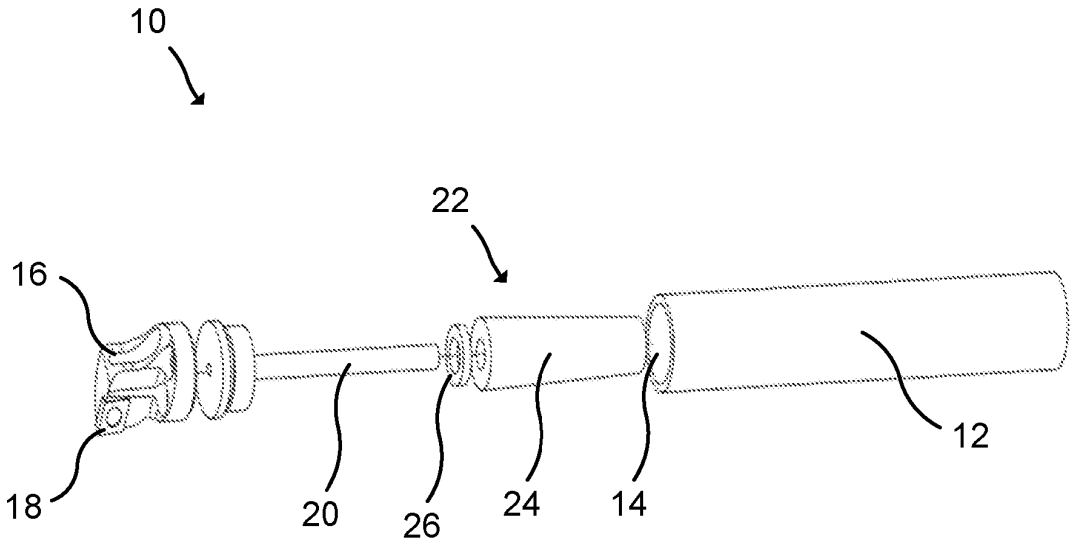



Fig. 1b

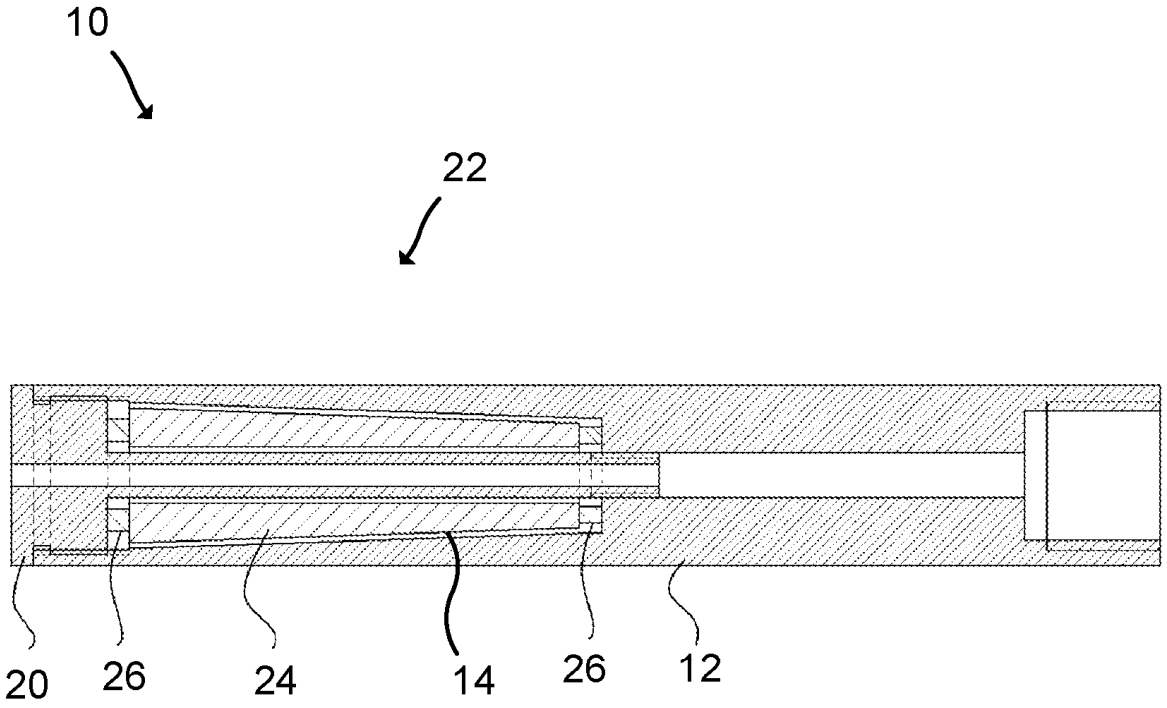



Fig. 2

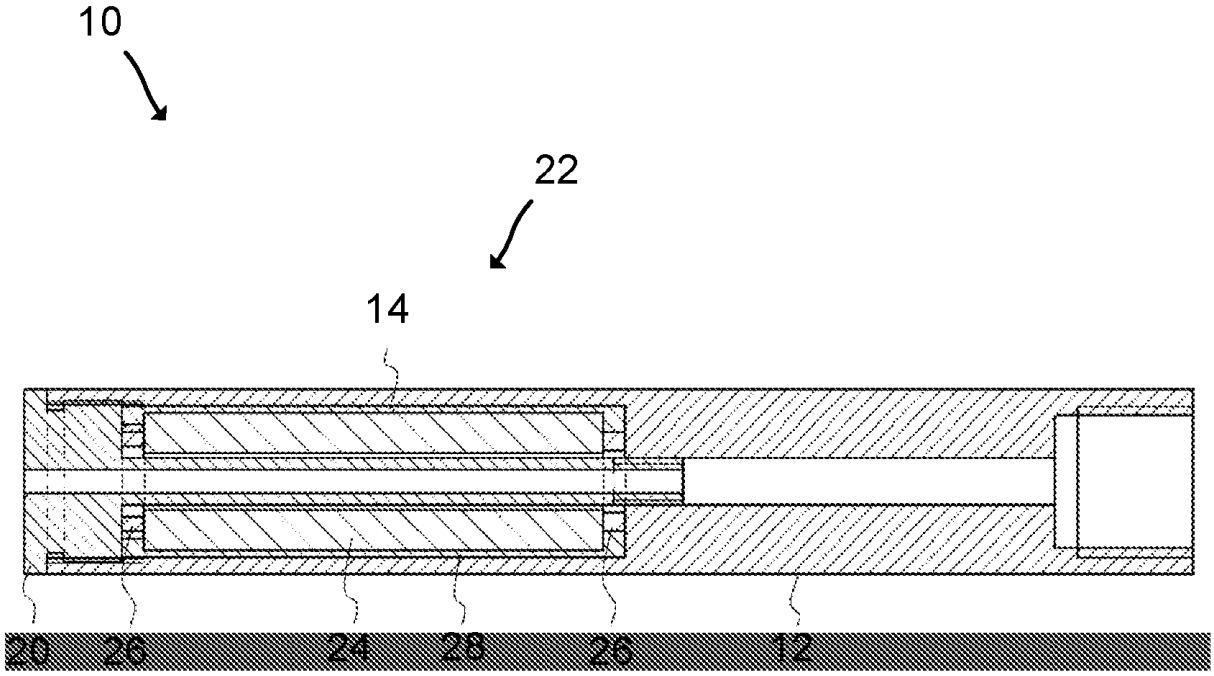



Fig. 3

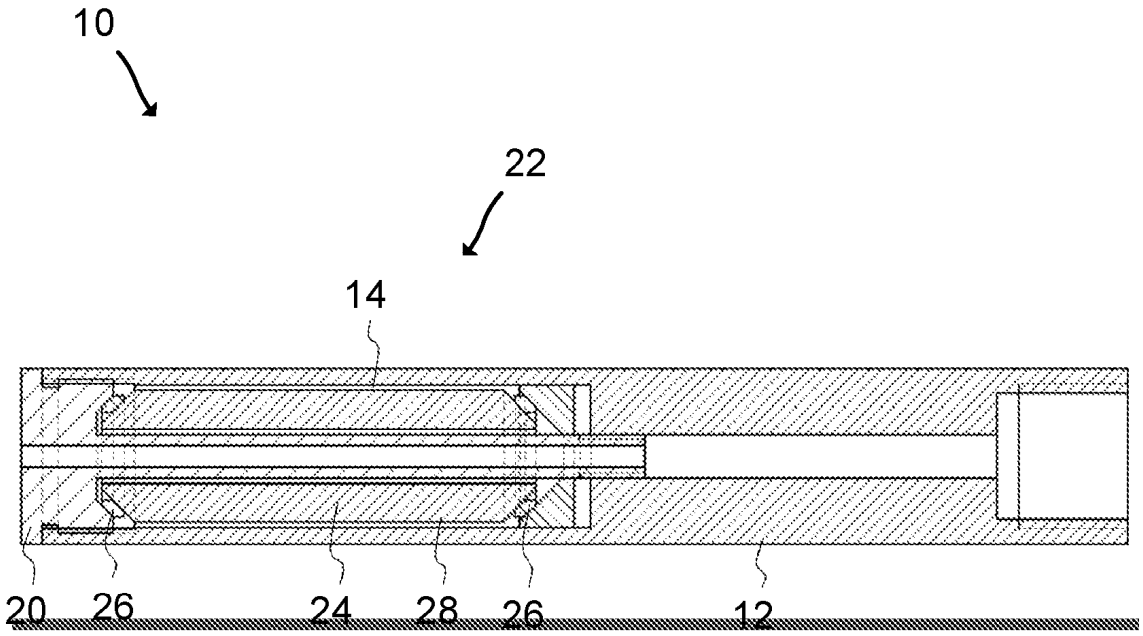



Fig. 4

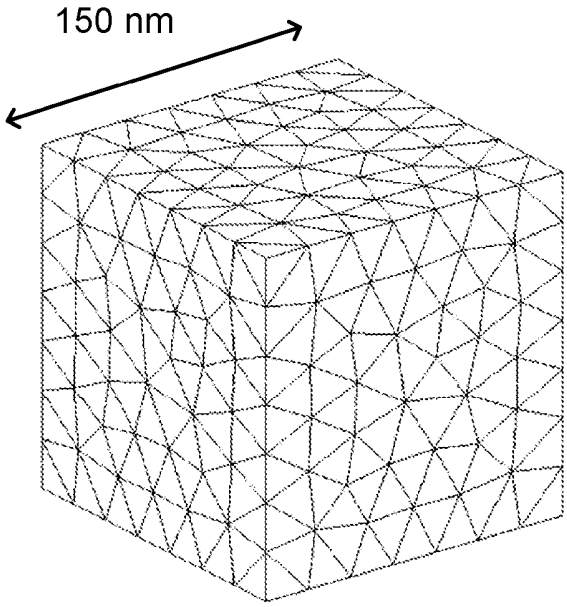



Fig. 5a

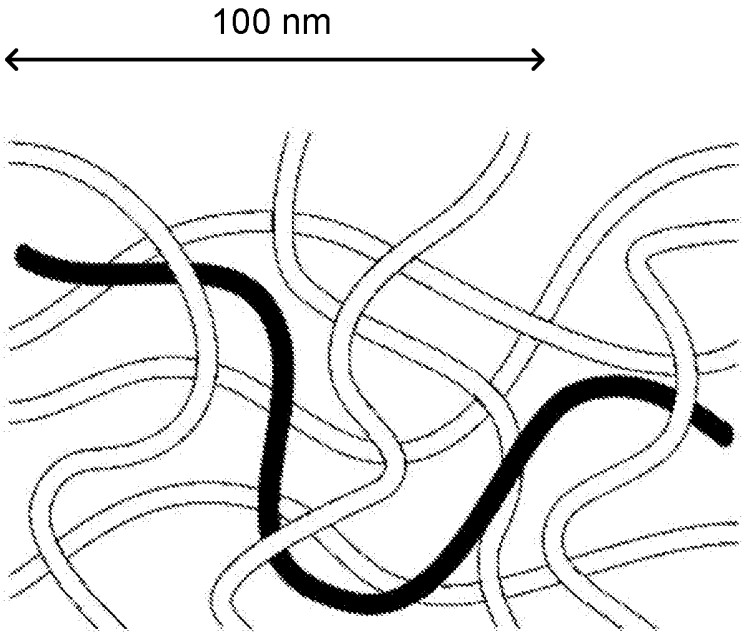



Fig. 5b

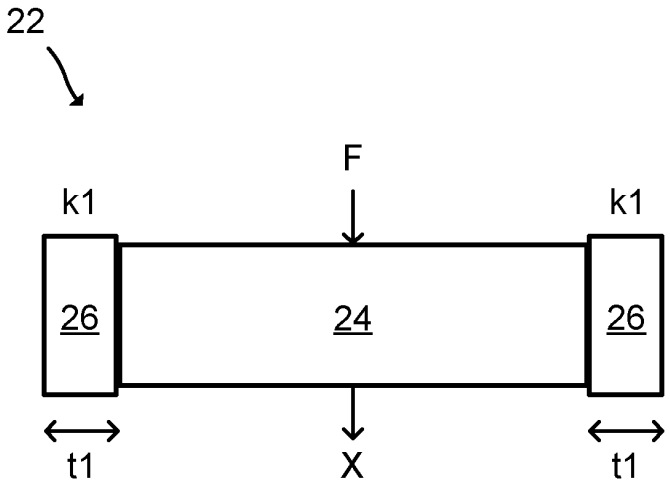



Fig. 6a

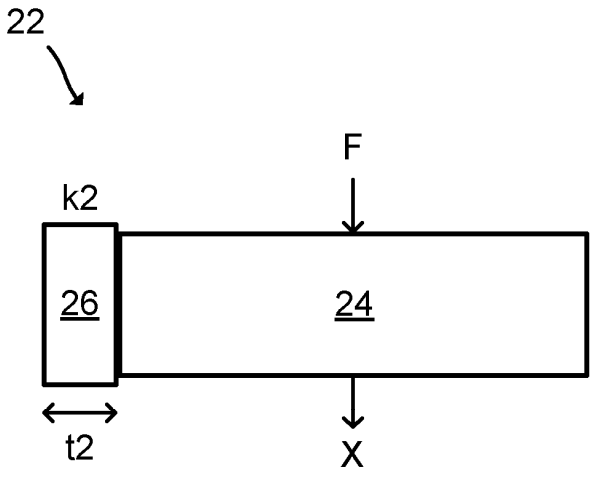



Fig. 6b