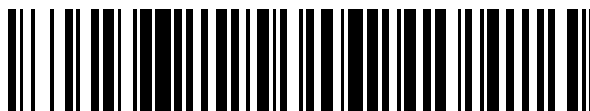


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 754 123**

51 Int. Cl.:

B23Q 1/48 (2006.01)

B23B 47/34 (2006.01)

B23Q 1/70 (2006.01)

B23Q 5/32 (2006.01)

B23Q 11/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.04.2016** **PCT/EP2016/057759**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.10.2016** **WO16162483**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.04.2016** **E 16716845 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2019** **EP 3280565**

54 Título: **Accionamiento de herramienta con árbol de husillo y procedimiento operativo**

30 Prioridad:

08.04.2015 DE 102015105338

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

15.04.2020

73 Titular/es:

LTI MOTION GMBH (100.0%)

Gewerbestrasse 5-9

35633 Lahnau, DE

72 Inventor/es:

DIRSCHERL, MARKUS y

VON LÖWIS, JOHANNES

74 Agente/Representante:

ESPIELL VOLART, Eduardo María

ES 2 754 123 T3

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

Accionamiento de herramienta con árbol de husillo y procedimiento operativo

5 Estado de la técnica

La presente invención se refiere a un accionamiento de herramienta con árbol de husillo y a un procedimiento operativo para el mecanizado de piezas con formación de viruta.

10 Los primeros trabajos en el campo del mecanizado con formación de viruta por vibración fueron llevados a cabo en la década de 1950 por Ptr. V. N. Poduraev en la Universidad Baumann de Moscú. Uno de sus principios fundamentales consiste en generar vibraciones u oscilaciones axiales además del movimiento de avance de la broca con el fin de conseguir virutas de perforación del tamaño más pequeño posible, que pueden retirarse fácilmente de la región de corte. Para ello se utilizan, en primer lugar, dos sistemas diferentes de árbol de husillo, los denominados sistemas de husillo
15 autovibrantes y los sistemas de husillo con aplicación externa de vibraciones.

En el caso de los sistemas de husillo autovibrantes, se utiliza la frecuencia natural de la herramienta para generar vibraciones propias y romper así las virutas de perforación y granularlas en trozos pequeños. La frecuencia de las vibraciones viene determinada por el sistema masa-muelle del árbol de husillo y del portaherramientas que incluye la
20 herramienta de perforación.

También se utilizan sistemas piezoeléctricos de accionamiento activo para la generación y el control de vibraciones superpuestas (véase, p. ej., el documento DE 10 2009 027 688 A1). Estos sistemas muestran altas frecuencias de vibraciones, de hasta 2 kHz o bastante más elevadas para los tamaños más pequeños de virutas de perforación, desde
25 unos pocos milímetros hasta micrómetros. Estos son particularmente adecuados para taladrar orificios pequeños.

El documento DE 103 43 682 A1 propone un sistema de herramientas con cojinetes mecánicos con un accionamiento lineal añadido que comprende un actuador piezoeléctrico o magnético que puede generar un movimiento de vibración en el eje longitudinal con una frecuencia ω . La generación de la oscilación de microvibración se alinea en una dirección
30 axial, y se lleva a cabo mediante un actuador magnético, que se inserta en el sistema de sujeción mecánica y que está previsto además del rodamiento mecánico y la sujeción ya presentes. Así, el documento DE 103 43 682 A1 describe un sistema de sujeción de herramienta de cono hueco con rodamientos mecánicos, en el cual un actuador se monta posteriormente en el alojamiento de la herramienta situado en el extremo del árbol de husillo. No se proporciona ninguna indicación sobre un ajuste adaptativo de las frecuencias o amplitudes de vibración en función de los materiales
35 utilizados, ni sobre ningún cojinete magnético axial activo. Esta solución tiene además la desventaja de que la energía necesaria para generar la vibración debe proporcionarse mediante anillos colectores o similares, con la consiguiente dificultad.

Asimismo, se pueden generar vibraciones utilizando sistemas mecánicos conocidos que se emplean, por ejemplo, en
40 taladros percutores convencionales. La frecuencia de impacto se fija mediante una combinación de la velocidad de rotación y el número de vibraciones por rotación, y equivale a solo unas pocas vibraciones por rotación, lo que permite conseguir pequeñas formas y tamaños de viruta.

En relación con la generación activa de vibraciones accionadas mecánicamente, cabe mencionar la tecnología SineHoling® de la firma francesa MITIS, la cual se describe, p. ej., en el documento US 2013 0051946A1. Mediante un engranaje mecánico relativamente complejo pueden superponerse vibraciones axiales de alta frecuencia a un árbol de
45 husillo.

La disposición y el uso de cojinetes magnéticos axiales y radiales para ejes de rotación de alta velocidad, p. ej., para bombas de vacío, son conocidos desde hace tiempo. Varios diseños de cojinetes magnéticos axiales y radiales se ilustran, por ejemplo, en el libro de Gerhard Schweitzer: *Magnetlager: Grundlagen, Eigenschaften and Anwendungen Berührungsfreier, Elektromagnetischer Lager*, Springer Verlag Taschenbuch, publicado el 27 de abril de 1993 (ISBN-13:
50 978-3662084496).

Especialmente en el campo de la perforación de orificios profundos se han constatado las ventajas significativas del mecanizado por vibración, en particular de la perforación por vibración y el fresado por vibración, en donde las virutas se pueden retirar del orificio perforado prácticamente sin dejar restos, y se reduce la temperatura de la pieza de trabajo y de la herramienta. Estos aspectos suponen particularmente una gran ventaja cuando se perfora sin usar lubricante, es decir, con el método de perforación en seco, y en aplicaciones en las que se deben perforar piezas hechas de una
55 mezcla de materiales, como las piezas de material compuesto que se encuentran en la industria aeronáutica. Al perforar materiales compuestos se obtienen virutas de diferentes tamaños, dependiendo del material adyacente al cabezal de perforación. Cuando se perforan piezas de trabajo, a medida que se desplaza el material se forma una rebaba a lo largo de la periferia de los orificios de entrada y salida. La altura y la amplitud de la rebaba dependen de la velocidad de avance, y pueden verse influidas por la generación de vibraciones de una herramienta de perforación.

Las desventajas del método anterior son la baja capacidad de control de la vibración y del proceso de mecanizado, el hecho de que las soluciones son constructivamente complejas y desperdician espacio, así como una menor eficiencia de la perforación.

5 Además, los ejes y husillos con cojinetes magnéticos son conocidos en el estado de la técnica, p. ej., en el documento DE 10 2005 030 724 A1, y se emplean preferiblemente en el campo de los accionamientos giratorios de alta frecuencia para bombas turbomoleculares, compresores y similares.

10 En el ámbito de los árboles de husillo con cojinetes magnéticos, los documentos DE 20 2007 010 B66 U1 y DE 10 2006 036 004 A1 describen árboles de husillo de perforación con cojinetes magnéticos que proporcionan una alineación axial del eje de husillo y un avance axial por medio de un control de las bobinas de los cojinetes magnéticos que generan campos magnéticos. El control de los cojinetes magnéticos se utiliza para la alineación cuasiestática del husillo en el proceso de la herramienta, por lo que no afecta al proceso de formación de viruta en sí, sino únicamente a una alineación del eje de husillo. Concretamente, el documento DE 10 2006 036 004 A se refiere a un accionamiento de
15 herramienta con cojinetes magnéticos dispuestos tanto axial como radialmente, cuyo objetivo es poder lograr movimientos de giro axial y radial mediante el accionamiento de los cojinetes magnéticos con el fin de guiar el mecanizado del material. No se hace ningún tipo de mención a que la perforación venga acompañada de movimientos superpuestos durante el avance de la perforación, en particular oscilaciones de microvibración.

20 En los documentos US 8 694 133 B2 y US 7 587 965 B2 se describe un método de control de un accionamiento de herramienta que realiza una modulación en la amplitud del avance para permitir un mecanizado de corte mejorado. En ellos se muestra un procedimiento de control provisto de un circuito de control, en el que se utilizan varios factores influyentes, como una medición de la distancia, una medición de la fuerza, una medición de la aceleración, una medición de la temperatura, una medición de la corriente o la potencia, un procesamiento de imágenes o un transductor de
25 desplazamiento óptico digital para regular una optimización de la potencia de avance y una frecuencia de vibración en la dirección axial.

En relación con un ámbito similar, los documentos DE 34 21 973 A1, DE 1 020 050 51 909 C5, DE 20 2007 010 866 U1 y AT 513 094 B1 se refieren a diseños constructivos de accionamientos de herramientas sometidos a vibraciones en los
30 cuales se emplean actuadores axiales de vibración ultrasónica o cojinetes magnéticos controlables radialmente para influir en el proceso de mecanizado de viruta.

El documento US 5 997 223 A se refiere a un cojinete magnético axial como parte de un actuador axial, diseñado para generar un avance del árbol de husillo.
35

El documento US 4 180 946 A describe un husillo de herramienta que comprende dos cojinetes magnéticos, uno de los cuales es un cojinete magnético axial conocido. Este diseño permite llevar a cabo un control de desplazamiento radial y axial del árbol de husillo en el rango de 1 µm.

40 El documento US 2013/257206 A1 describe un dispositivo de precarga para un cojinete magnético. Un primer cojinete magnético soporta axialmente un movimiento de rotación de un eje, mientras que en un segundo cojinete magnético dispuesto en una posición axialmente desplazada respecto al eje, un mecanismo de prensado mecánico ejerce una fuerza de deslizamiento, de manera que un elemento deslizante ejerce una fuerza de presión sobre el segundo cojinete magnético. El elemento deslizante o el mecanismo de prensado consisten preferentemente en un cojinete de bolas, en
45 el que la fuerza centrífuga causada por el movimiento rotativo hace que las bolas se muevan radialmente hacia el exterior, lo que provoca un contacto mecánico con el elemento de cuña y, por lo tanto, ejerce una fuerza de presión axial. Una herramienta con esta configuración se puede utilizar en máquinas de desbaste y rectificado a bajas revoluciones, así como en máquinas de mecanizado fino a altas revoluciones.

50 El documento DE 10 2011 080796 A1 describe un cojinete axial mecánico que puede soportar cargas que actúan tanto en sentido radial como axial. Para ello, el cojinete axial mecánico comprende un elemento rodante esférico o un anillo exterior del cojinete y un anillo interior del cojinete separado del anillo exterior y situado delante de él. Mediante una configuración magnética puede generarse una fuerza de precarga magnética entre estos dos anillos de cojinete. Esta precarga permite evitar el uso de un cojinete adicional.

55 El documento EP 1 724 502 A2 describe un dispositivo de acoplamiento hidráulico que se comunica con un elemento rotor y puede funcionar con medios refrigerantes comprimibles o incompresibles. El dispositivo de acoplamiento hidráulico permite el funcionamiento de un dispositivo de acoplamiento con un solo canal de entrada y un dispositivo de enclavamiento externo para lubricar con medios lubricantes las superficies de sellado incluidas en este. El dispositivo de
60 acoplamiento de fluidos proporciona una unidad rotativa de alta velocidad, de manera que el fluido se introduce en la unidad rotativa a través de un único canal de entrada. Es suficiente con que la unidad rotativa tenga una sola abertura de entrada y un único elemento de sellado secundario o elástico dispuesto estructuralmente para proporcionar la relación equilibrada correcta que permita que la unión giratoria funcione con medios incompresibles y comprimibles.

65 Sobre la base del estado de la técnica mencionado anteriormente, el objetivo de la invención es proporcionar un

procedimiento mejorado para el mecanizado optimizado de formación de viruta.

Este objetivo se logra mediante un procedimiento operativo según la reivindicación independiente. Otros desarrollos ventajosos de la invención son objeto de las reivindicaciones dependientes.

Descripción de la invención

De acuerdo con la invención, se proporciona un procedimiento operativo para un accionamiento de herramienta con árbol de husillo, en el que el accionamiento de herramienta puede llevar a cabo el procedimiento, que comprende al menos un actuador axial electromagnético y un dispositivo de control y/o regulación del actuador axial para modificar la posición en el eje longitudinal del árbol de husillo, en donde el dispositivo de control y/o regulación controla el actuador axial para generar un movimiento de microvibración del árbol de husillo, independientemente de un movimiento de avance y superponible a este, con el fin de influir en el tamaño y la forma de la viruta del material extraído. El actuador axial electromagnético puede generar movimientos de microvibración axial del árbol de husillo mediante un control variable del dispositivo de control y/o regulación, con el fin de influir en la formación de viruta, en particular para generar virutas de pequeño tamaño y fácilmente extraíbles. De este modo se puede lograr una adaptación de una vibración axial del árbol de husillo para ajustarse a los parámetros variables del proceso de mecanizado con formación de viruta, como, por ejemplo, un desgaste de la herramienta, la temperatura de la herramienta y de la pieza de trabajo, los distintos tipos de material, la estructura compleja de la pieza (p. ej., materiales compuestos), etc. Esto se puede lograr influyendo de forma controlada y variable en la corriente de accionamiento del actuador axial electromagnético que regula una posición axial del árbol de husillo.

El accionamiento de herramienta comprende un dispositivo de control y/o regulación diseñado para generar el movimiento de microvibración, y que puede controlar y regular otras tareas como el avance de la herramienta, el control del motor de accionamiento y otros parámetros del proceso de mecanizado de viruta. El accionamiento puede incluir otros sensores y actuadores, en particular un motor de accionamiento del árbol de husillo y un actuador de la pieza de trabajo para determinar la posición de la pieza de trabajo en relación con la herramienta. El árbol de husillo es un árbol de accionamiento directo o indirecto dispuesto de forma precisa y provisto de una interfaz de herramienta integrada. El árbol de husillo es un componente importante de muchas máquinas-herramienta modernas.

El actuador axial puede estar dispuesto como un cojinete magnético axial, como un motor lineal o como una combinación de un cojinete magnético axial y un motor lineal. Así, el motor lineal puede generar al mismo tiempo un movimiento de avance macro y un movimiento de microvibración, o el movimiento de microvibración puede ser llevado a cabo por un cojinete magnético axial. De este modo, el propio árbol de husillo genera movimientos de microvibración, y no solo proporciona un alojamiento dispuesto en la sección final del árbol de husillo en el que se monta la herramienta. La elevada masa del árbol de husillo con la herramienta acoplada puede realizar movimientos de microvibración con un alto impulso y la correspondiente acción de mecanizado. Por consiguiente, unos movimientos de microvibración reducidos acompañados de una masa adecuada del árbol de husillo con el sistema de herramienta acoplado pueden proporcionar una elevada carga de impulso. Según la invención, el árbol de husillo está dispuesto magnéticamente al menos axialmente por medio de un cojinete magnético axial, o puede moverse axialmente por medio de un motor lineal. Los cojinetes radiales del árbol de husillo están dispuestos de modo que permiten realizar movimientos axiales, y se pueden disponer como cojinetes mecánicos con holgura para los movimientos de vibración. De esta manera, mediante un accionamiento eléctrico del cojinete magnético axial y/o del motor lineal se generan impactos de vibración en el árbol de husillo en la dirección de la herramienta, los cuales influyen directamente en el tamaño de las virutas generadas. El control eléctrico permite un ajuste adaptativo del movimiento de microvibración, el cual puede ajustarse en función de los parámetros de mecanizado de la viruta, tales como el tipo de material, la velocidad de rotación, la velocidad de avance, etc. La dirección del movimiento axial corresponde a la dirección del eje de rotación del husillo y de la herramienta.

De esta manera, se proporciona un procedimiento operativo según la invención que utiliza el accionamiento de herramienta con árbol de husillo provisto de cojinetes magnéticos anteriormente descrito, en el que, mediante al menos un actuador axial electromagnético que actúa como cojinete magnético, se superpone un movimiento de microvibración axial ajustable del árbol de husillo independientemente de un movimiento de avance, con el fin de influir en el tamaño y la forma de la viruta resultante de la extracción de material en perforaciones, especialmente en perforaciones de orificios profundos.

Los cojinetes radiales del árbol de husillo pueden proporcionarse básicamente en forma de cojinetes mecánicos con holgura suficiente para permitir las oscilaciones de microvibración axiales del árbol de husillo. Sin embargo, los cojinetes mecánicos causan pérdidas por fricción y acortan la vida útil del accionamiento. En un desarrollo ventajoso adicional, al menos un cojinete radial del árbol de husillo, preferiblemente todos los cojinetes, pueden disponerse como cojinetes líquidos y/o cojinetes neumáticos. Un cojinete líquido puede ser, por ejemplo, un cojinete de deslizamiento hidrodinámico o hidrostático, en el que una película de aceite se somete a presión con ayuda de una bomba de aceite externa, de modo que las dos partes que se mueven una respecto a la otra no se tocan directamente. Predomina la fricción de baja pérdida de fluidos. Un cojinete neumático puede disponerse en forma de cojinete aerostático o aerodinámico, en donde los dos conjuntos de cojinetes en movimiento están separados por una fina película de aire.

Esto permite un movimiento sin fricciones ni deslizamientos con tirones. Estos tipos de cojinetes permiten, al menos dentro de ciertos límites, una movilidad axial prácticamente exenta de fricción y sin resistencia mecánica o abrasión incrementadas, por lo que resultan ventajosamente adecuados para la configuración de cojinetes radiales del árbol de husillo, al cual se superponen axialmente movimientos de microvibración. Estos tipos de cojinetes presentan un diseño delgado y robusto, y pueden integrarse fácilmente en accionamientos de herramientas.

En un desarrollo ventajoso adicional de la invención, al menos uno, preferiblemente todos los cojinetes radiales, están configurados como cojinetes magnéticos radiales que pueden ser controlados por el dispositivo de control y/o regulación para generar movimientos radiales del árbol de husillo. De esta manera, no solo se pueden generar movimientos axiales, sino también radiales, en particular movimientos de microvibración para romper la viruta y para conseguir un procedimiento de mecanizado de viruta más eficiente. Combinando los movimientos de vibración axiales con el ajuste radial, p. ej., la inclinación o el desplazamiento lateral del eje de rotación, se puede lograr, en particular, una mejora del avellanado o un mecanizado de precisión mediante una herramienta combinada. Una ventaja del cojinete radial magnético combinado con un movimiento de vibración axial es que los rodamientos convencionales de los husillos de mecanizado no permiten ninguna oscilación axial y, en consecuencia, implican un alto nivel de desgaste, en particular a altas revoluciones.

En un desarrollo ventajoso adicional, el dispositivo de regulación y/o control puede configurarse para realizar un movimiento radial guiado del husillo mediante al menos un cojinete magnético radial, de modo que pueda llevarse a cabo el desbarbado de un orificio de perforación y/o una ampliación radial de un canal de perforación. Los árboles de husillo con cojinetes magnéticos ofrecen la posibilidad de mover el eje al menos mínimamente en una dirección radial. Esto se puede utilizar, p. ej., para desbarbar perforaciones, de modo que, después del taladrado y con un árbol de rotación centrado, la pieza de trabajo y el husillo se mueven primero uno con respecto al otro de tal manera que la región de corte de la broca está situada casi por completo en la región del orificio perforado a desbarbar. En esta posición, un movimiento continuo circular del cojinete radial (mediante la especificación de las correspondientes curvas nominales en ambos planos del cojinete radial, o solo en el plano del cojinete radial del lado de la herramienta) hace que los bordes de corte de la herramienta barran todo el reborde del orificio perforado y eliminan las rebabas existentes. De esta manera, también se pueden realizar procesos adicionales de avellanado o desbarbado en la parte inferior de la pieza de trabajo de forma sofisticada.

Con una herramienta de mecanizado adecuada, también es posible desbarbar el borde del lado de salida del orificio perforado.

La movilidad radial del eje de un husillo de perforación con cojinetes magnéticos también permite fresar mínimamente un orificio perforado existente (p. ej., utilizando una herramienta de fresado más pequeña que el diámetro del orificio), de manera que se especifiquen curvas nominales para ambos planos del cojinete radial que permitan que el eje de rotación del árbol describa una trayectoria circular.

La transición continua entre la rotación centrada del árbol y la rotación del árbol con un movimiento circular del eje de rotación del árbol es apropiada tanto para desbarbar como para fresar un orificio perforado. En principio, ajustando la posición de los ejes del árbol también se pueden generar geometrías de perforación cónicas u otras no circulares.

En un desarrollo ventajoso adicional de la invención, pueden proporcionarse dos o más cojinetes axiales y/o radiales para aumentar las fuerzas de ajuste. De esta manera, al menos un cojinete axial está equipado con al menos un actuador y, eventualmente, con una pluralidad de actuadores, para aumentar la fuerza. Los actuadores se pueden controlar secuencialmente en paralelo o de forma individual para aumentar globalmente la energía de mecanizado.

Un aspecto característico de la invención es la adaptación de la generación de microvibraciones del árbol de husillo a diversos parámetros del proceso de formación de viruta. Para este propósito, es particularmente ventajoso que el dispositivo de regulación y/o control comprenda una unidad de memoria y/o una unidad de generación de funciones, y que esté configurado para especificar valores nominales de la curva de oscilación, en particular la frecuencia y amplitud de los movimientos de microvibración en función de los datos geométricos y/o físicos de la pieza de trabajo, y/o las variables de proceso y/o las entradas de control medidas o determinadas indirectamente. Así, durante el proceso de mecanizado se puede tener en cuenta la estructura geométrica de la pieza de trabajo o las distribuciones o variaciones de material, con el fin de aplicar movimientos de microvibración adaptados en función de determinadas posiciones de la pieza de trabajo y profundidades de avance. Para especificar los valores nominales de las oscilaciones de microvibración también pueden utilizarse parámetros como, por ejemplo, la velocidad de rotación, la velocidad de avance, la presión de avance, el consumo de energía del motor de accionamiento, el par del árbol de husillo, la corriente del motor, la posición axial y/o radial del husillo u otros parámetros de proceso.

La curva nominal para la posición axial puede generarse con ayuda de una tabla o mediante la superposición de funciones. La curva nominal es, por regla general, una función periódica, al margen de las transiciones al penetrar en el material o al cambiar de capa en materiales compuestos. La duración del período de esta función se puede elegir independientemente de la velocidad de rotación del husillo. Una relación de $1,5 = T_{\text{rot}}/T_{\text{desv}}$ entre la duración del período de rotación del husillo T_{rot} y la duración del período T_{desv} de la curva nominal de posición axial es útil y

tecnológicamente ventajosa. Sin embargo, el procedimiento no se limita a esta relación. Una curva nominal del movimiento de microvibración puede tener los siguientes parámetros operativos, que se pueden configurar individualmente:

- 5 • especificación de perfil empírica;
- regulación de corriente máx.;
- control previo o control de superposición con control de avance de nivel superior;
- inclusión de la posición axial medida del husillo;
- 10 • consideración de los valores estáticos (posición típica de contacto con la pieza de trabajo, conocimiento de la estructura y dimensiones de la pieza).

Una ventaja importante de la solución de perforación con vibración propuesta en comparación con el estado de la técnica es que es el propio árbol de husillo el que realiza la oscilación, sin necesidad de incorporar ningún otro elemento generador de oscilaciones adicional entre el árbol de husillo y la herramienta. De este modo se consiguen las siguientes ventajas sobre el estado de la técnica:

- Diseño compacto del sistema, sin necesidad de incluir un adaptador para el montaje en serie;
- alta precisión (p. ej., marcha concéntrica), ya que no se requiere ni un adaptador ni una extensión;
- posibilidad de utilizar alojamientos estándar para herramientas, que resultan económicos;
- 20 - intercambio sencillo de herramientas gracias al uso de alojamientos para herramientas estándar de husillos convencionales.

En el estado de la técnica se emplean elementos activos de vibración, acoplados posteriormente y accionados eléctricamente, los cuales requieren energía adicional en el sistema (anillo colector, inductancia, etc.). En el accionamiento de herramienta para el procedimiento operativo según la invención, la energía se toma del suministro para el husillo de perforación con cojinetes magnéticos, lo que permite lograr una mayor eficiencia energética y evitar el coste y la complejidad del cableado y el abastecimiento energético.

Una gran ventaja del accionamiento de herramienta es que la corriente eléctrica en el cojinete axial está relacionada con la fuerza axial durante la perforación. A medida que aumenta la fuerza, también lo hace la corriente. Esto permite analizar y optimizar el proceso de perforación sin equipos de medición adicionales y costosos para, p. ej., llevar a cabo análisis sobre la vida útil (la fuerza aumenta con el desgaste creciente) o para el desarrollo de herramientas o procesos. En un desarrollo ventajoso adicional, el dispositivo de control de avance puede configurarse para detectar variables del proceso de mecanizado, como el contacto con la superficie de la pieza y/o la penetración de una capa de material diferente, y para especificar valores nominales del movimiento de microvibración del dispositivo de control de la posición axial.

En un desarrollo ventajoso adicional de la invención, el dispositivo de regulación y/o control puede configurarse para ajustar el valor nominal de la curva de oscilación de al menos una sección de movimiento parcial de los movimientos de microvibración, y/o para activar o desactivar un movimiento de microvibración en el proceso de mecanizado. De esta manera, a través de un ajuste de la forma de la curva puede modificarse el tiempo de actuación de la herramienta o los parámetros operativos para el suministro de lubricante a fin de limpiar el orificio perforado. Son adecuadas las definiciones de movimiento con forma de splines o parabólicas que pueden hacer la transición a otras curvas de movimiento de forma continua, y posiblemente con diferenciales continuos.

Una ventaja importante de la solución de perforación por vibración propuesta respecto al estado de la técnica consiste en la capacidad de parametrizar con un alto grado de libertad la curva de oscilación axial, tal como se requiere para diferentes parámetros de proceso (en particular, el diámetro del orificio perforado, el material, la velocidad de rotación y la velocidad de avance). Esto permite variar la amplitud de la oscilación o desactivarla. Es posible optimizar el proceso de corte de viruta y reducir el esfuerzo de la herramienta utilizando curvas de posición axial adecuadas y predefinidas. Mediante una selección adecuada de las curvas de posición axial, p. ej., reduciendo la velocidad axial en el punto de contacto de la herramienta con la pieza de trabajo, tanto las corrientes de control requeridas como el esfuerzo resultante de la herramienta se pueden reducir de forma significativa.

En particular, el accionamiento de herramienta propuesto y el procedimiento de mecanizado relacionado, difieren del estado de la técnica en la capacidad de parametrizar con un alto grado de libertad la forma de oscilación, la frecuencia de oscilación, la amplitud, la velocidad de rotación de la herramienta y la magnitud de avance continuo de la perforación. Con una combinación adecuada de estos parámetros se puede influir en la velocidad de entrada en el material y, por lo tanto, en el esfuerzo de la herramienta. La reducción del esfuerzo permite, por ejemplo, utilizar materiales de corte frágiles o recubrimientos como el diamante.

La desactivación es útil, por ejemplo, para el acabado de un avellanado, con el fin de que la geometría del avellanado no tenga un perfil de altura axial.

- Un sistema de regulación del cojinete magnético del husillo de perforación generalmente incluye un circuito de regulación para la posición axial (p. ej., un controlador PID o un controlador de estado). Para mejorar la dinámica de los circuitos de regulación, se puede proporcionar ventajosamente un control previo. En particular, es útil complementar el controlador de posición axial con un control previo. Este controlador de posición axial genera una corriente nominal para un circuito de regulación de corriente subordinado. El controlador de posición axial y el controlador de corriente axial estabilizan el movimiento del husillo en la dirección axial a lo largo de la curva de posición axial nominal. Para lograr curvas de posición axial apropiadas para perforar de la manera más efectiva posible, es útil complementar el controlador de posición axial con un control previo de corriente. La corriente nominal del controlador de corriente del cojinete axial es, por tanto, la suma de la corriente calculada por el controlador de posición axial y la corriente axial de control previo.
- En un desarrollo ventajoso adicional, el dispositivo de regulación y/o control puede comprender una unidad de control de posición axial que intercambia datos de forma ventajosa con un dispositivo de control de avance dispuesto en posición anterior para generar el movimiento de avance lineal.
- Para la generación dinámica de los valores de corriente nominales de los elementos de cojinete axial, en el dispositivo de regulación y control se pueden introducir diferentes variables y parámetros activos. Además de los parámetros de proceso habituales, como las curvas de posición axial nominal, el material, el diámetro del orificio perforado y la estructura/geometría de la pieza de trabajo, para determinar los valores de corriente nominales pueden tenerse en cuenta los valores medidos o los valores de estado determinados indirectamente, como la velocidad de rotación del husillo, la posición axial real del husillo, las corrientes de control del elemento de cojinete axial o el par real. Además, a través de líneas de control pueden iniciarse procesos de conmutación, como la desactivación de la microvibración o limitaciones dinámicas de las 5 variables de ajuste.
- En el dispositivo de regulación y control se pueden almacenar diferentes curvas de posición axial en forma de tablas, y es posible alternar entre ellas según el modo operativo.
- Dado que las curvas de corriente de control previo requeridas para los distintos parámetros de proceso (curvas de posición axial nominal, material, diámetro del orificio perforado, velocidad de avance, velocidad de rotación, etc.) son diferentes, resulta además ventajoso ajustar la curva de corriente de control previo de forma adaptativa. Para este ajuste adaptativo se evalúa la desviación entre la posición axial nominal y la posición axial real. Además, se aprovecha el hecho de que una parte significativa de la señal de corriente de control previo también es periódica (con la duración del período de la curva de posición axial nominal T_{desv}). El objetivo de la adaptación es minimizar la magnitud de la diferencia entre la posición axial nominal y la real.
- Como resultado del proceso de perforación, las fuerzas actúan sobre el árbol en una dirección axial, y son contrarrestadas por el controlador de posición axial mediante el ajuste de la corriente axial nominal. Por lo tanto, gracias a la corriente axial nominal o a la corriente axial real es posible detectar el momento en que el taladro penetra en el material. En el caso de los materiales compuestos, también se pueden detectar las transiciones entre capas. Esta información puede utilizarse para ajustar los parámetros de la oscilación de la posición axial nominal. La información también puede transmitirse al control del eje de avance para ajustar la velocidad de avance en función del material. La información también se puede utilizar para ajustar la velocidad de rotación del husillo.
- El ajuste de los parámetros de la oscilación de la posición axial nominal también se puede lograr a través del control del eje de avance o mediante una combinación de instrucciones de control y de los valores determinados a partir de la corriente axial.
- En un desarrollo ventajoso adicional, el dispositivo de control de avance y/o el dispositivo de control de la posición axial pueden configurarse para provocar un cambio en los parámetros de la especificación de movimiento del cojinete a través de un perfil de movimiento continuo. Es útil disponer una transición continua entre diferentes conjuntos de parámetros de la oscilación de la posición axial nominal.
- El principio del uso de cojinetes magnéticos axiales para la generación de movimientos de microvibración, en combinación, si procede, con cojinetes neumáticos axiales, es que el principio de funcionamiento es comparable con el de un motor lineal de accionamiento directo.
- La frecuencia de la vibración depende principalmente del diámetro de la herramienta y también del material. El movimiento de microvibración axial y radial se puede aplicar de forma adaptativa a tareas de mecanizado determinadas, y puede ajustarse dinámicamente durante el proceso de mecanizado.
- En un desarrollo ventajoso adicional, el dispositivo de regulación y/o control puede configurarse para generar movimientos de microvibración mediante los actuadores de entre 1 Hz y 1 kHz, preferiblemente de entre 5 Hz y 500 Hz, en donde es posible ajustar una relación de la frecuencia de rotación de la herramienta con la frecuencia de microvibración, la cual está preferiblemente en el rango de 1 a 3, en particular 1,5, y/o en donde se puede ajustar una amplitud de movimiento de microvibración de entre 0,01 mm y 1 mm, preferiblemente de entre 0,01 mm y 0,5 mm. La frecuencia de vibración viene dada por la relación entre la frecuencia de rotación de la herramienta y las vibraciones por

rotación. El factor es variable y puede asumir valores típicos de 1,5. La amplitud de la oscilación puede depender del diámetro de la herramienta y del tipo de material.

De forma ventajosa, las variables operativas y de medición del cojinete magnético y del accionamiento están vinculadas entre sí. De este modo, una necesidad de par aumentado para el husillo, p. ej., un aumento de la corriente en el regulador del accionamiento, puede provocar una reducción del avance y la adaptación de la curva de valor nominal del movimiento de microvibración, ya que el proceso de corte de viruta se encuentra con un material más duro.

En un desarrollo ventajoso adicional se puede proporcionar al menos un dispositivo de precarga magnética, en particular un dispositivo de precarga magnética permanente, para especificar una fuerza en el árbol de husillo en una dirección predeterminada, en particular en una dirección axial del eje de la herramienta. Así, como medida constructiva, se puede proporcionar una precarga magnética permanente para reducir la pérdida de potencia o para ejercer presión de forma activa sobre la pieza de trabajo, también en caso de que sea necesario para generar una «presión opuesta» que compense las fuerzas de masa del husillo.

Para reducir las pérdidas de potencia que se producen en el cojinete magnético o en el rotor (p. ej., debido a pérdidas por corrientes parásitas), los cojinetes magnéticos pueden diseñarse como cojinetes unipolares o con precarga magnética permanente.

También es posible encapsular los sensores, los actuadores y el cableado para ofrecer una mejor protección y una mayor vida útil frente a las fuerzas de vibración que se producen.

El mecanizado de formación de viruta genera una alta carga térmica en el área de la herramienta situada en el extremo axial del árbol de husillo. En un desarrollo ventajoso adicional, se introduce aire comprimido a través del árbol de husillo y de la herramienta para soplar fuera del orificio perforado las pequeñas virutas resultantes del proceso de perforación y para conseguir un efecto refrigerante. Pueden añadirse aditivos al aire comprimido, como aceite o pequeñas gotas de aceite fino para lubricación, por ejemplo, para proporcionar una lubricación de cantidad mínima. Alternativamente, en lugar de aire comprimido se puede usar otro gas para soplar las virutas fuera del orificio perforado. Alternativamente, en lugar de aire comprimido se puede usar un líquido para expulsar las virutas del orificio perforado.

En un desarrollo ventajoso adicional, el árbol de husillo puede comprender al menos un canal de refrigerante para un fluido refrigerante y lubricante, en particular un refrigerante o lubricante en estado gaseoso o líquido. El fluido refrigerante y lubricante se puede pasar desde la parte estacionaria del accionamiento de herramienta a través del árbol de husillo hasta la herramienta de formación de viruta para retirar las virutas y refrigerar la herramienta, lo cual permite aumentar tanto el rendimiento de mecanizado como la vida útil de la herramienta.

Ventajosamente, puede implementarse de manera flexible un punto de descarga del medio gaseoso o líquido que puede alimentarse al árbol de husillo, de modo que el árbol de husillo pueda realizar movimientos axiales o radiales en el rango de 0,01 mm a 0,5 mm. Esto se puede conseguir, por ejemplo, mediante un material elástico o un elemento elástico similar a un fuelle.

En un desarrollo ventajoso adicional, un portaherramientas, que normalmente está dispuesto en un extremo axial del árbol de husillo, puede disponerse en ángulo respecto al árbol de husillo mediante al menos un elemento de desviación angular, preferiblemente un engranaje de desviación, un engranaje angular o una junta cardán, preferiblemente a 90° respecto al eje del árbol de husillo. El engranaje de desviación o angular, la junta universal o la junta cardán sirven para unir dos árboles no alineados. En una junta universal, el ángulo de desviación se puede modificar durante la transferencia del par. El árbol de husillo y el portaherramientas se pueden alinear entre sí en cualquier ángulo deseado, preferiblemente en un ángulo de 90°. De esta manera, entre el árbol de husillo y el portaherramientas se puede incorporar un elemento de desviación, como una junta cardán o un engranaje angular, de modo que los ejes de rotación del árbol de husillo y del portaherramientas estén acodados. El uso de un elemento de desviación de 90 grados implica que, para una oscilación axial de la herramienta de perforación, la oscilación se puede generar en el cojinete magnético radial o en un cojinete magnético axial adicional que actúa sobre el portaherramientas. La desviación convierte las oscilaciones radiales del árbol de husillo en oscilaciones axiales de la herramienta. Los impactos axiales que se producen en la herramienta se transfieren como modificaciones radiales al árbol de husillo, de modo que se consigue una conversión técnica de la vibración entre el árbol de husillo y la herramienta. Esto permite conseguir un diseño compacto, y que las máquinas-herramienta existentes se puedan reequipar con un accionamiento de herramienta según la invención.

En un desarrollo ventajoso adicional, la parte fija o la parte móvil del accionamiento de herramienta puede comprender un dispositivo generador de vibraciones de compensación, el cual está configurado para compensar las vibraciones del árbol de husillo en el accionamiento de herramienta. Para que el árbol de husillo provoque el menor número de vibraciones posible en un carro de avance o en el bastidor de la máquina, especialmente a altas frecuencias o altas aceleraciones, en un desarrollo ventajoso adicional es posible compensar la vibración (al menos parcialmente), de manera que se combine con un sistema de vibraciones de marcha contraria o de dirección opuesta. El actuador para el sistema de vibraciones de marcha contraria puede basarse, por ejemplo, en un principio de funcionamiento

piezoeléctrico o magnético. Un actuador para la generación de vibraciones de compensación puede someterse a señales de vibración recíprocas a las del árbol de husillo, o puede compensar un comportamiento dinámico del árbol de husillo de forma reactiva mediante un circuito de control basado en sensores de vibración.

- 5 De forma ventajosa, puede utilizarse al menos un cojinete magnético axial y/o un motor lineal como actuador axial para generar movimientos axiales de microvibración. Para aumentar la fuerza, puede ser ventajoso el uso combinado de ambos actuadores. El motor lineal también puede generar un movimiento de avance macro, y un cojinete magnético axial una vibración. Los actuadores también se pueden utilizar por separado.
- 10 De forma ventajosa, dentro del alcance del procedimiento operativo propuesto del accionamiento de herramienta, al menos un cojinete magnético radial puede ser sometido a movimientos radiales, en particular a movimientos de microvibración. Esto puede influir en la formación de viruta de otras dimensiones, y se puede lograr un guiado radial de la herramienta de formación de viruta.
- 15 En un desarrollo ventajoso adicional, el árbol de husillo puede ser guiado radialmente por el cojinete magnético radial a fin de generar un movimiento controlado del husillo para desbarbar un orificio de perforación y/o ampliar radialmente un canal de perforación. De este modo, la herramienta puede llevar a cabo otras operaciones de mecanizado.
- 20 En un desarrollo ventajoso adicional, la corriente de control para el funcionamiento del actuador axial, en particular de los cojinetes magnéticos, puede limitarse a valores máximos especificables mediante un circuito de control y regulación integrado en el dispositivo de control y regulación. Esto evita daños en el accionamiento de la herramienta.
- 25 En un desarrollo ventajoso adicional, la curva de oscilación nominal del movimiento de microvibración, en particular la amplitud y la frecuencia del movimiento de microvibración, puede seleccionarse en función de los parámetros de perforación determinables directa o indirectamente, y ajustarse durante el proceso de perforación. Esto permite una generación adaptativa de las oscilaciones de microvibración.
- 30 En un desarrollo ventajoso adicional, los cambios en los parámetros de perforación determinables directa o indirectamente y/o los parámetros de la curva de valor nominal de la generación del movimiento de microvibración se pueden evaluar en relación con el desgaste de la herramienta. De esta manera, se puede aplicar un mayor consumo de energía con parámetros de perforación por lo demás idénticos, un aumento en el movimiento de vibración, un mayor par u otros parámetros de proceso recopilados para controlar el movimiento de microvibración para, en relación con la abrasión, el desgaste o los daños de la herramienta, lograr una supervisión mejorada, una mayor fiabilidad y una reducción de costes en el mecanizado de virutas, en particular en el marco de la producción en serie.
- 35 En un desarrollo ventajoso adicional, el dispositivo de control y regulación puede limitar a valores máximos predeterminables las fuerzas de proceso generadas, en particular, la presión de contacto, la fuerza de avance, la velocidad de rotación y/o el par de la herramienta. De este modo, se puede detectar el desgaste y evitar el daño y el sobrecalentamiento de la herramienta.
- 40 En un desarrollo ventajoso adicional, una curva de valor nominal del movimiento de microvibración puede especificar una velocidad de avance más baja en el momento o antes de colocar la herramienta sobre la pieza de trabajo. En este caso, la herramienta se puede frenar antes de colocarla sobre la superficie de la pieza, y se puede reducir el impulso de impacto para no forzar los filos de corte de la herramienta y se aumente la vida útil de esta.
- 45 En un desarrollo ventajoso adicional, el árbol de husillo puede desviarse excéntricamente respecto al eje del árbol de husillo para compensar los desequilibrios. Preferiblemente, esto puede ser útil a velocidades de rotación más altas, en particular en el rango por encima de aproximadamente 800 rpm, para poder eliminar los desequilibrios y las vibraciones, y también para poder llevar a cabo procesos de trabajo de esfuerzo excéntrico, como los procesos de achaflanado, etc.
- 50 En el caso de que el sistema de herramienta esté sometido a un esfuerzo excesivo, a cargas de impulso no deseadas, o a una oscilación de resonancia mecánica, puede producirse una colisión, es decir, un contacto mecánico entre el árbol de husillo y el entorno del cojinete magnético. En los accionamientos de giro rápido, esto puede provocar daños o la destrucción de los cojinetes o del árbol de husillo. En un desarrollo ventajoso del procedimiento operativo, es posible detectar las colisiones no deseadas de la herramienta por medio de sensores de posición de los cojinetes magnéticos
- 55 incluidos en el dispositivo de regulación y/o control, y se pueden adoptar medidas correctoras para evitar el estado de colisión. La protección contra colisiones se puede implementar de manera ventajosa y sencilla. Antes de una posible colisión, no existe contacto directo debido al espacio de aire existente en los cojinetes magnéticos axiales o radiales. La desviación del árbol de husillo se puede medir mediante un sistema de sensores de posición de nivel superior, lo que permite detectar a tiempo una colisión y prevenirla. De esta manera es posible reducir, aumentar o desactivar, por ejemplo, la frecuencia de rotación, el par o la velocidad de avance del árbol de husillo con el fin de evitar una propensión
- 60 a la colisión.

Dibujos

Otras ventajas se desprenderán de la explicación de las figuras que sigue a continuación. Las figuras muestran realizaciones ilustrativas de la invención. Las figuras, la descripción y las reivindicaciones contienen numerosas características combinadas. El experto en la materia también podrá considerar oportunamente las características de forma individual y agruparlas en otras combinaciones adicionales útiles.

Las figuras muestran:

- 10 **Fig. 1** Una primera realización ilustrativa de un accionamiento de herramienta según la invención con un árbol de husillo con cojinetes magnéticos.
- Fig. 2** Una segunda realización ilustrativa de un accionamiento de herramienta según la invención con un árbol de husillo con cojinetes magnéticos.
- Fig. 3** Diagrama de un movimiento de avance macro deseado de un árbol de husillo.
- 15 **Fig. 4** Diagrama de una superposición de microvibración axial de un árbol de husillo según la invención.
- Fig. 5** Diagrama de superposición del macro y micromovimiento de las figs. 3 y 4.
- Fig. 6** Representación esquemática de cada una de las etapas de perforación al perforar una pieza de trabajo de material compuesto según una realización de la invención.
- Fig. 7** Representación esquemática de una formación de rebaba en un orificio de paso.
- 20 **Fig. 8** Diagrama de bloques de una realización de un dispositivo de control y/o regulación según la invención.
- Fig. 9** Otra realización ilustrativa de un accionamiento de herramienta según la invención con un árbol de husillo con cojinetes magnéticos.

En las figuras, los componentes idénticos o similares están numerados con signos de referencia idénticos.

- 25 Las figs. 1 y 2 muestran en ambos casos un aparato para el mecanizado de orificios en piezas de trabajo, en particular en piezas de metal, plástico o material compuesto según distintas realizaciones de la invención.

- 30 Tal como se muestra en la fig. 1, la estructura fundamental de dicho aparato comprende un accionamiento 1 de herramienta con un árbol 3 de husillo accionado en rotación por un accionamiento 2 de husillo, al cual se fija una herramienta 5 que trabaja en la pieza 4 de trabajo. La herramienta 5 se fija al árbol 3 de husillo mediante un portaherramientas 6 y gira alrededor del eje S de husillo o del eje de la herramienta. La pieza 4 de trabajo se fija en un alojamiento 7 de pieza de trabajo o portapiezas de trabajo y, en caso necesario, también puede girar alrededor del eje W de la pieza de trabajo. Además, en la realización ilustrativa de la fig. 1 se incluye un dispositivo mecánico 8 de avance para el accionamiento 1 de herramienta. El dispositivo 8 de avance (o unidad de alimentación) incluye un carro 9 de avance o de alimentación que se puede desplazar en un bastidor 11 de máquina mediante un accionamiento 10 de avance o de alimentación. El accionamiento 1 de herramienta está dispuesto de forma fija en el carro 9 de avance mediante un soporte 12 de husillo.

- 40 El árbol 3 de husillo está montado en el accionamiento 1 de herramienta en al menos dos cojinetes radiales 13a, 13b y en al menos un cojinete axial 14 en cinco direcciones axiales. El cojinete axial 14 comprende dos imanes de bobina toroidal que están dispuestos axialmente en sentido contrario a un anclaje deslizante que está dispuesto de forma no giratoria alrededor del árbol de husillo, y por medio de los cuales es posible un desplazamiento del árbol en una dirección axial. Además, se proporcionan un cojinete radial superior e inferior, o uno posterior y delantero 13a, 13b, estando dispuesto el accionamiento 2 de husillo entre estos dos cojinetes radiales 13a, 13b. En la realización ilustrativa, el accionamiento 2 de husillo es un motor asíncrono multipolar.

- 45 Tanto los cojinetes radiales 13a, b como el cojinete axial 14 están diseñados como cojinetes magnéticos. Las partes del rodamiento de estos cojinetes magnéticos se mantienen separadas por un espacio de aire gracias a fuerzas magnéticas, las cuales son generadas y reguladas mediante electroimanes. Esto permite que el eje S de husillo se mueva y se ajuste dentro de ciertos límites en los cojinetes radiales 13a, 13b en dirección radial y en el cojinete axial 14 en dirección axial.

- 50 La fig.1 muestra además que la realización ilustrativa comprende un dispositivo 16 de control o regulación que está conectado a los dos cojinetes radiales 13a, b, al cojinete axial 14 y al accionamiento 2 de husillo. Con ayuda del dispositivo 16 de control y/o regulación, que incluye una pluralidad de módulos 17 de regulación, es posible ajustar inicialmente de forma dinámica y variable un desplazamiento radial V y el ángulo de ataque. Al menos un sensor 18, 19 de medición está asignado a los cojinetes radiales 13a, 13b y al cojinete axial 14, en donde el sensor 18 de medición está integrado preferiblemente en los cojinetes magnéticos 13a, b, 14. El dispositivo 16 de control y/o regulación influye en el cojinete axial 14 así como en los dos cojinetes radiales 13a, b de manera que los movimientos de vibración en la dirección del eje longitudinal, así como en la dirección radial, pueden aplicarse activamente de forma controlada con frecuencia y amplitud ajustables para conseguir los tamaños y formas de viruta deseados, minimizar el desarrollo de calor, aumentar la vida útil y acortar los tiempos de perforación.
- 55
- 60

Dado que no solo los cojinetes radiales 13a, 13b, sino también el cojinete axial 14, están diseñados como cojinetes magnéticos, dentro del ámbito de la invención es posible ajustar también la posición del árbol 3 de husillo en dirección axial dentro del accionamiento 1 de herramienta mediante el cojinete axial 14. Esto se consigue mediante el ajuste exacto de la distancia magnética dentro del cojinete axial 14 y la modulación de un movimiento de vibración ajustable, de modo que el movimiento de alimentación o de avance pueda realizarse dentro de ciertos límites mediante el accionamiento del cojinete axial 14. De esta manera, se logra inicialmente una aproximación axial de la herramienta 5 en pasos muy pequeños e independientemente del dispositivo 8 de avance electromotriz adicional que puede estar presente, el cual puede proporcionar un ajuste aproximado de la posición axial y desplazar todo el accionamiento 1 de herramienta. Los cojinetes axiales magnéticos 14 pueden utilizarse para influir en la distancia de avance, la velocidad de avance y, en particular, la fuerza de avance o la fuerza de presión de la herramienta 5 contra la pieza 4 de trabajo.

Teniendo en cuenta los sensores 19 de medición integrados, es posible realizar un mecanizado de formación de viruta controlado por fuerza o por fuerza y desplazamiento con una modulación de los movimientos de microvibración. Los valores de medición determinados a través de los cojinetes permiten extraer conclusiones sobre el estado de la herramienta 5 y sobre cualquier posible rotura de esta, por lo que también aquí se puede realizar un control sencillo y fiable sin necesidad de emplear sensores de medición independientes.

El dispositivo 16 de control y regulación puede diseñarse como un PC industrial o como parte de un PC industrial conectado a los sensores 18, 19 de medición. Este PC convierte los valores de corriente medidos en los cojinetes a través de los sensores 18 y/o 19 en valores de fuerza que se transmiten a un control de desplazamiento, de forma que, durante el mecanizado, se puede llevar a cabo un control o regulación combinados de fuerza o desplazamiento y el movimiento de vibración se puede adaptar a las condiciones de perforación actuales.

Una realización modificada de la invención se ilustra en la fig. 2. Esta muestra la perforación en una superficie de forma libre con una herramienta 5 provista de un recubrimiento con material de corte para el mecanizado de superficies de alta precisión, p. ej., una muela de diamante. Dado que la herramienta 5 se puede posicionar axial y radialmente de forma libre y totalmente automática dentro de ciertos límites por medio del husillo 3 con ayuda de los cojinetes radiales magnéticos 13a, b y el cojinete magnético axial 14, es posible, mediante el accionamiento electrónico de los cojinetes 13a, 13b, 14 a través del dispositivo de control o regulación, asegurar un posicionamiento preciso de la herramienta teniendo en cuenta la superficie de forma libre a crear o mecanizar. Así, para la mecanización de formación de viruta, una superficie de forma libre ya formada se puede mecanizar de forma adaptativa mediante un sistema de control de fuerza. Sin embargo, también existe la posibilidad de mecanizar o crear la superficie de forma libre eliminando material, teniendo en cuenta los valores previamente calculados con precisión e introducidos en el dispositivo de control o regulación.

La fig. 3 ilustra el avance continuo deseado de una herramienta de perforación, en donde la abscisa del ángulo de rotación de la herramienta se muestra en grados [°], y la ordenada ilustra una profundidad de penetración en [mm]. El objetivo es lograr un avance deseado de 0,06 mm por cada rotación de la herramienta de perforación.

En relación con esto, la fig. 4 muestra una curva de valor nominal de un movimiento de vibración axial en la dirección de perforación llevado a cabo por la herramienta de perforación en una realización de la invención, en donde se debe lograr una amplitud de carrera de 0,13 mm a una frecuencia de carrera de 1,5 Hz de la herramienta de perforación. En la parte baja de la carrera (sección P) de la curva de valor nominal, el filo cortante de la herramienta de perforación toca el suelo de perforación y, por lo tanto, la superficie de la pieza de trabajo. En la zona de la sección P de la curva de valor nominal es posible influir en la velocidad axial de manera que un cabezal de herramienta entre suavemente en contacto con la superficie de la pieza de trabajo, reduciendo así el impulso de impacto y aumentando la vida útil de la herramienta. La curva de valor nominal en el área de la sección P se puede ajustar teniendo en cuenta los parámetros de material y de proceso especificados. La curva de valor nominal de la vibración puede adaptarse al proceso de perforación de forma dinámica.

Seguidamente, la fig. 5 muestra una curva de valor nominal superpuesta del avance continuo de acuerdo con la fig. 3 y de un movimiento de vibración optimizado según la fig. 4, lo cual permite lograr un avance continuo y una oscilación axial de la posición en el eje longitudinal del filo de corte, de modo que, especialmente al realizar una perforación profunda, se pueden retirar fácilmente las virutas de perforación, se reduce el desarrollo de calor, se aumenta la vida útil y se acorta el tiempo de mecanizado. La sección P ilustrada muestra el contacto de la herramienta de perforación con el suelo de perforación en el que comienza el mecanizado de la herramienta sobre la pieza de trabajo y la formación de viruta con un avance reducido y ajustable. La fig. 6 muestra una perforación 30 de una pieza 38 de trabajo compuesta con una capa superior metálica 38a y una capa inferior 38b compuesta de fibra de carbono, como la que se utiliza, por ejemplo, en el ala de un avión. En la etapa S1, la herramienta 32 de perforación, que gira alrededor del eje 34, se coloca con la punta 36 de corte sobre la superficie de la capa metálica 38a para formar un orificio 40 de entrada. En las etapas siguientes S2 y S3, la herramienta 32 de perforación perfora con movimientos de vibración superpuestos en el eje longitudinal hasta alcanzar la superficie separadora 44 situada entre la capa metálica 38a y la 38b. Dado que el proceso de corte y la formación de viruta se modifica en la capa inferior 38b de material compuesto, es posible ajustar la frecuencia y la amplitud de la vibración (p. ej., aumentando la amplitud y reduciendo la frecuencia), logrando así una mayor velocidad de avance conservando el mismo tamaño y la misma forma de viruta. El contacto con la superficie

separadora 44 o la perforación de esta se puede detectar indirectamente por un cambio en el consumo de energía o en el comportamiento dinámico (p. ej., el par o la velocidad de avance de la herramienta 32 de perforación), o, si se conoce la geometría de antemano, se puede detectar al alcanzar una profundidad de penetración predeterminada en el orificio perforado 30, de manera que pueda adaptarse el movimiento de superposición de vibraciones. En las etapas S4 a S5 se perfora la segunda capa 38b de material hasta que se crea un orificio 42 de salida inferior, por el que pasa la punta 36 de perforación a través del canal 46 de perforación.

La fig. 7 muestra un canal 46 de perforación de una perforación 50 a través de una pieza 52 de trabajo. Por regla general, tanto el orificio 40 de entrada como el orificio 42 de salida presentan rebabas 54, provocadas por el desplazamiento del material. Las rebabas 54 no son deseables, ya que generan separaciones no deseadas durante los procesos de unión, suponen un riesgo de lesiones y afectan, p. ej., a las propiedades aerodinámicas. La formación de rebabas suele eliminarse posteriormente con herramientas de desbarbado. Gracias al procedimiento de perforación según la invención, la formación de rebaba puede reducirse significativamente por la adaptación selectiva de los movimientos de vibración al realizar los orificios 40, 42 de entrada y salida del canal 46 de perforación, de modo que el mecanizado posterior resulta innecesario o solo debe realizarse en menor grado.

La fig. 8 muestra un diagrama de bloques de una realización de un dispositivo 60 de regulación y control que puede ser utilizado en un accionamiento 1 de herramienta según la invención para controlar un actuador axial electromagnético de un árbol 3 de husillo para accionar una herramienta giratoria 5, 32, como una taladradora o una fresadora. El dispositivo 60 puede integrarse en un controlador de actuador axial. El dispositivo 60 de control y/o regulación comprende una unidad 66 de control de microvibraciones, que puede disponerse como un sistema de procesador de actuador programable almacenado. A la unidad 66 de control está conectada una unidad 62 de memoria, la cual almacena un gran número de curvas de valor nominal de las oscilaciones de microvibración, así como perfiles macro establecidos para diferentes procesos de perforación, por ejemplo, para distintos materiales, materiales compuestos, procesos de perforación profunda, procesos de fresado, etc. A la unidad 66 de control también está conectada una unidad 64 de memoria para los parámetros operativos y las curvas de valor real, la cual registra los cambios en los parámetros operativos y almacena las curvas de valor real de las vibraciones, con el fin de que los cambios en los parámetros y/o en las curvas de valor real se puedan utilizar para determinar una condición de desgaste de la herramienta 5, 32. Así, directamente mediante sensores o indirectamente por medio de variables derivadas, se pueden almacenar parámetros directos e indirectos de perforación como, por ejemplo, la corriente del motor I_{mot} , la velocidad de giro de la herramienta N_{rot} , el avance nominal SV_{set} , el par de giro de la herramienta M_{mot} , la posición real axial del husillo ASP_{act} y la posición real radial del husillo RSP_{act} . La unidad 66 de control suministra una o varias corrientes de control IS_{mag} para el accionamiento del actuador o actuadores axiales y, en su caso, del actuador o actuadores radiales, y también puede transmitir información de estado a un controlador de máquina-herramienta de nivel superior. Además, en el dispositivo de control y/o regulación es posible introducir una o más entradas y salidas de funciones para la programación y adaptación externas del comportamiento del control de microvibraciones y para leer los parámetros.

La fig. 9 muestra otra realización ilustrativa de un accionamiento 1 de herramienta para un procedimiento operativo según la invención con un árbol 3 de husillo, un alojamiento 6 de herramienta y una herramienta 5 de formación de viruta. En líneas generales, el árbol 3 de husillo tiene el mismo diseño que la realización de la fig. 2. A diferencia de esta, en el extremo axial del árbol 3 de husillo, el portaherramientas 6 con la herramienta 5 no está conectado al árbol de husillo 3 de forma fija en la dirección longitudinal del árbol 3 de husillo, sino que el eje de rotación del portaherramientas 6 está girado 90° respecto al eje de rotación del árbol 3 de husillo a través de un elemento 23 de desviación angular, por ejemplo un engranaje angular. Esto asegura un intercambio cinemático de los movimientos axiales y radiales del árbol 3 de husillo con los movimientos radiales y axiales de la herramienta 5. El cojinete magnético radial 13 del árbol de husillo puede generar un movimiento axial de la herramienta 5, y se puede lograr una desviación radial de la herramienta 5 mediante el cojinete magnético axial 14 y también mediante el cojinete magnético radial 13. El uso del elemento 23 de desviación angular reduce el tamaño estructural del accionamiento 1 de la herramienta, de modo que, por ejemplo, este se puede montar posteriormente en la bancada de una máquina-herramienta de mecanizado. En esta realización ilustrativa también se puede prescindir del cojinete magnético axial 14 si no se requiere la movilidad radial de la herramienta 5 en al menos una dirección.

Leyendas

- 1 Accionamiento de herramienta
- 2 Accionamiento de husillo
- 3 Árbol de husillo
- 4 Pieza de trabajo
- 5 Herramienta de formación de viruta
- 6 Portaherramientas/mandril de sujeción
- 7 Alojamiento para pieza de trabajo
- 8 Dispositivo mecánico de avance
- 9 Carro de avance
- 10 Accionamiento de avance
- 11 Bastidor de la máquina
- 12 Soporte del husillo

	13	Cojinete magnético radial
	14	Cojinete magnético axial
	15	
	16	Dispositivo de control y/o regulación
5	17	Módulos de control
	18	Sensor de medición
	19	Sensor de medición
	30	Perforación
10	32	Herramienta de perforación
	34	Eje de la herramienta
	36	Punta de corte
	38	Capa de material
	40	Orificio de entrada
15	42	Orificio de salida
	44	Superficie separadora de la capa de material
	46	Canal de perforación
	50	Perforación
20	52	Pieza de trabajo
	54	Rebaba de perforación
	60	Dispositivo de control y/o regulación
	62	Unidad de memoria de curvas de valor nominal
	64	Unidad de memoria de parámetros operativos y de curvas de valor real
25	65	Unidad de control de microvibraciones

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento operativo para un accionamiento (1) de herramienta con árbol (3) de husillo para un mecanizado de formación de viruta, que comprende al menos un actuador axial electromagnético y un dispositivo (16) de control y/o regulación del actuador axial para modificar la posición del árbol (3) de husillo en el eje longitudinal, en donde el dispositivo (16) de control y/o regulación controla el actuador axial para generar un movimiento de microvibración del árbol (3) de husillo, en donde se proporciona al menos un cojinete magnético axial (14) y/o un motor lineal al menos como parte del actuador axial, caracterizado por que el actuador axial electromagnético superpone un movimiento de microvibración axial ajustable del árbol (3) de husillo independientemente del avance, a fin de influir en el tamaño y la forma de la viruta resultante de la extracción de material en perforaciones, en particular en perforaciones de orificios profundos.
2. Procedimiento operativo según la reivindicación 1, caracterizado por que al menos un cojinete magnético axial (14) y/o un motor lineal se utiliza como actuador axial para generar los movimientos axiales de microvibración.
3. Procedimiento operativo según las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado por que al menos un cojinete magnético radial (13a, 13b) se utiliza para generar un movimiento radial, en donde preferiblemente el árbol (3) de husillo es guiado radialmente por el cojinete magnético radial (13a, 13b) a fin de generar un movimiento controlado del husillo para desbarbar un orificio (40, 42) de perforación y/o ampliar radialmente un canal (46) de perforación.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la corriente de control para el funcionamiento del actuador axial, en particular de los cojinetes magnéticos (13a, 13b, 14), está limitada a valores máximos predeterminables por circuitos de control y regulación dentro del dispositivo (16) de control y regulación, y/o la curva de oscilación nominal del movimiento de microvibración, en particular, la amplitud y la frecuencia del movimiento de microvibración, se selecciona en función de parámetros de perforación directa o indirectamente determinables y se ajusta durante el proceso de perforación, en donde preferiblemente los cambios en los parámetros de perforación determinables directa o indirectamente y/o los parámetros de la curva de valor real del movimiento de microvibración se evalúan en relación con un desgaste de la herramienta (5).
5. Procedimiento operativo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el árbol (3) de husillo se desvía excéntricamente con respecto al eje del árbol de husillo para compensar los desequilibrios.
6. Procedimiento operativo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el dispositivo de control y regulación limita las fuerzas de proceso generadas, en particular, la presión de contacto, la fuerza de avance, la velocidad de rotación y/o el par de la herramienta (5) a valores máximos predeterminables.
7. Procedimiento operativo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que una curva de valor nominal del movimiento de microvibración especifica una velocidad de avance menor durante o antes del posicionamiento de la herramienta sobre la pieza (4, 52) de trabajo.
8. Procedimiento operativo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que un sistema de sensores de posición de los cojinetes magnéticos incluido en el dispositivo (16, 60) de regulación y/o control sirve para detectar colisiones no deseadas de la herramienta y adoptar medidas para evitar el estado de colisión.

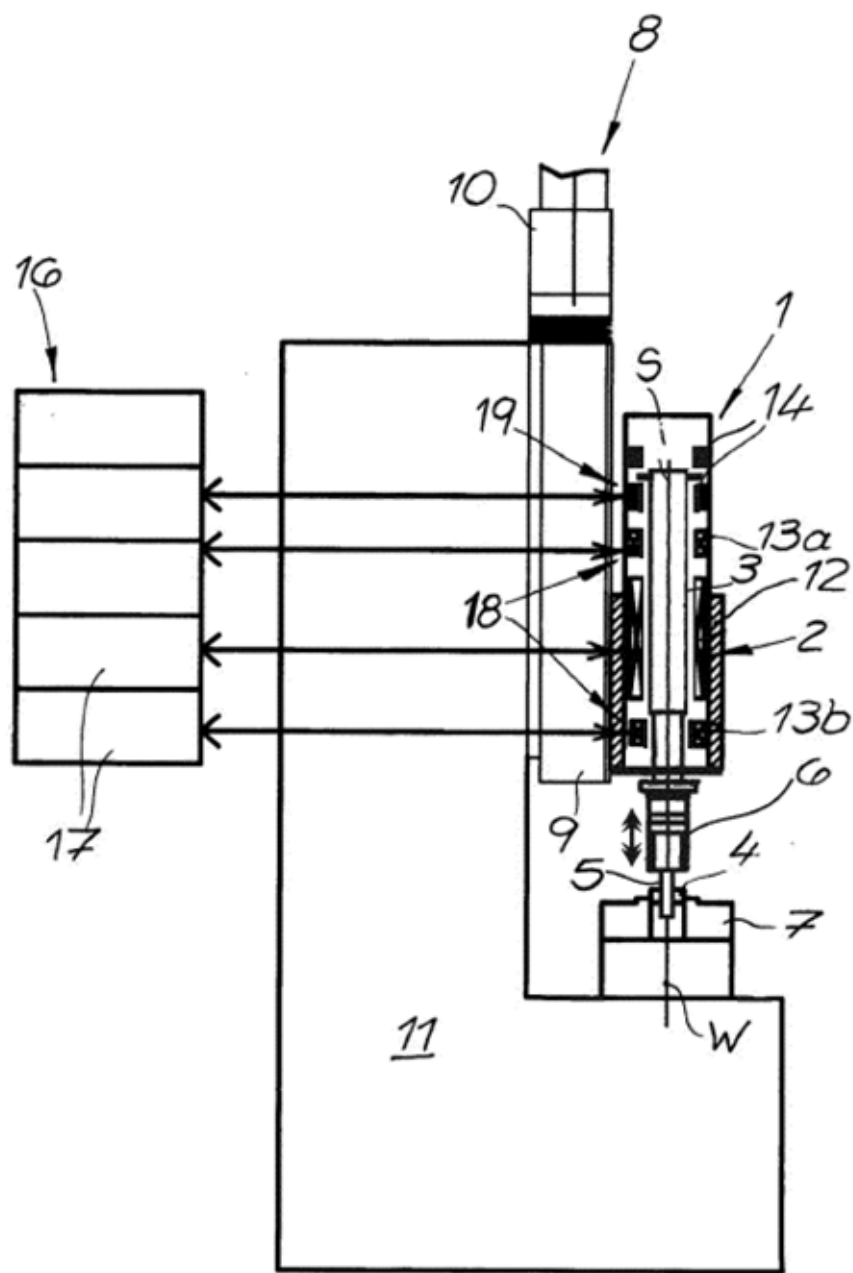


Fig. 1

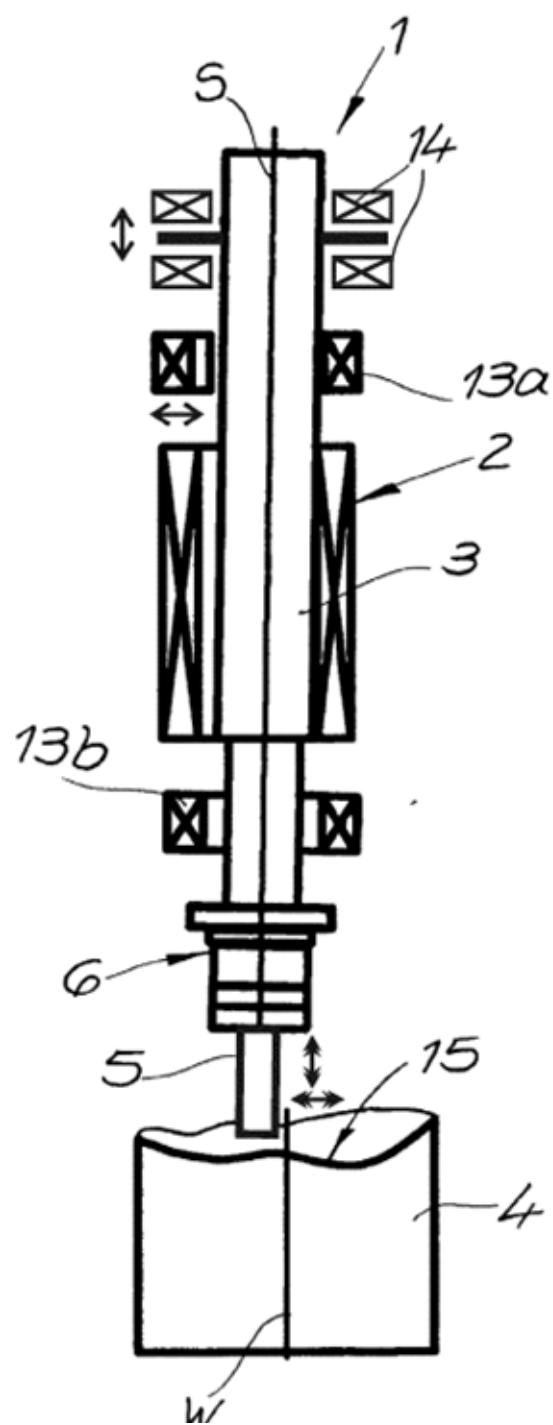


Fig. 2

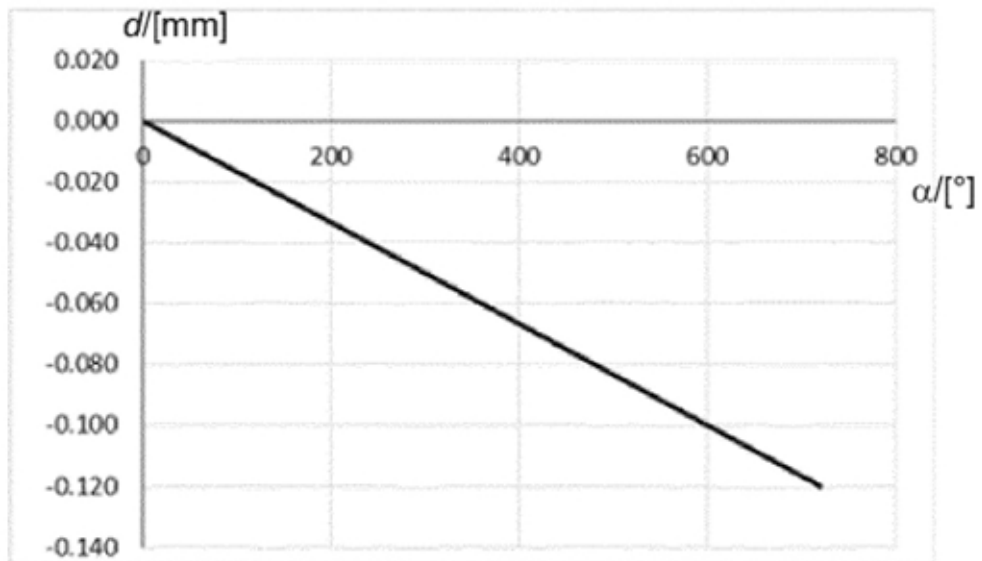


Fig. 3

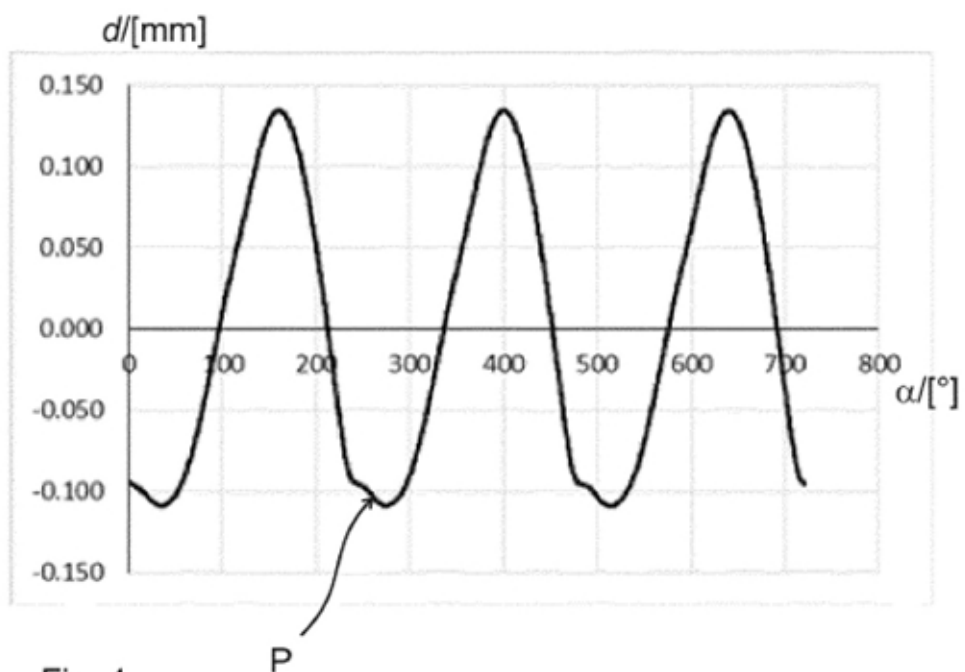


Fig. 4

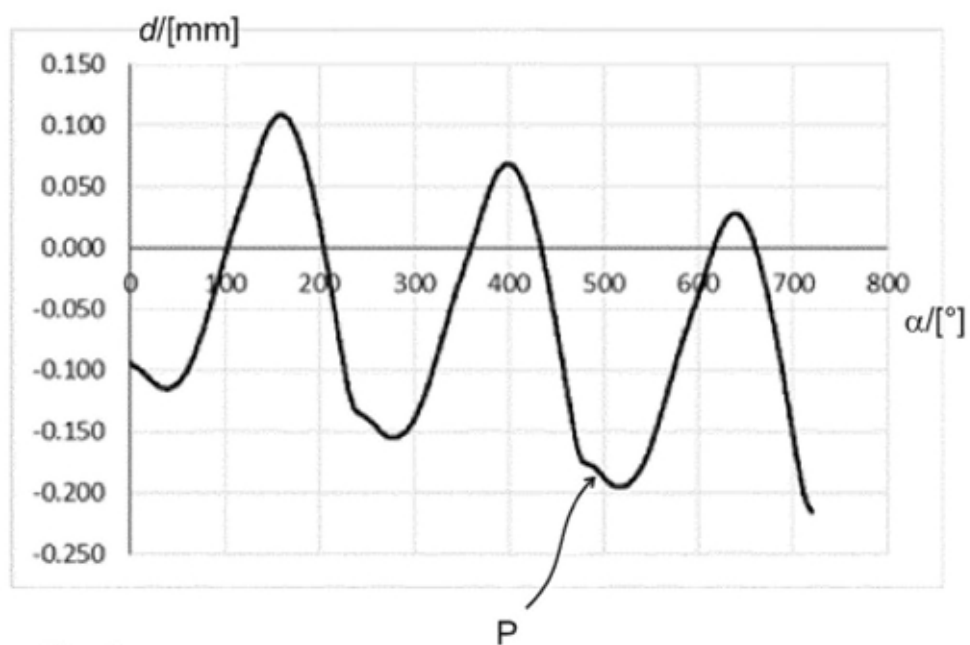


Fig. 5

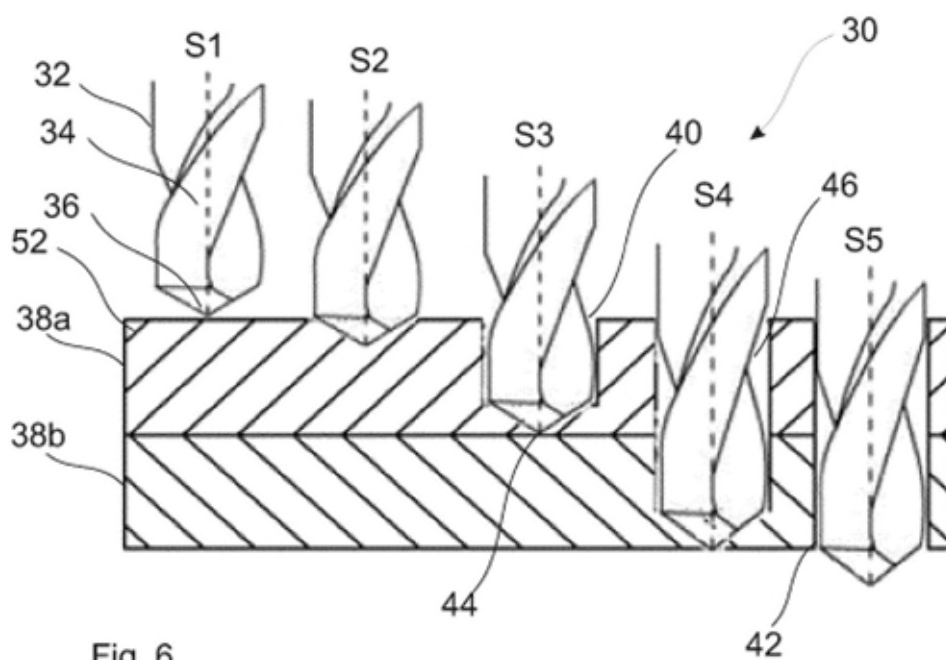


Fig. 6

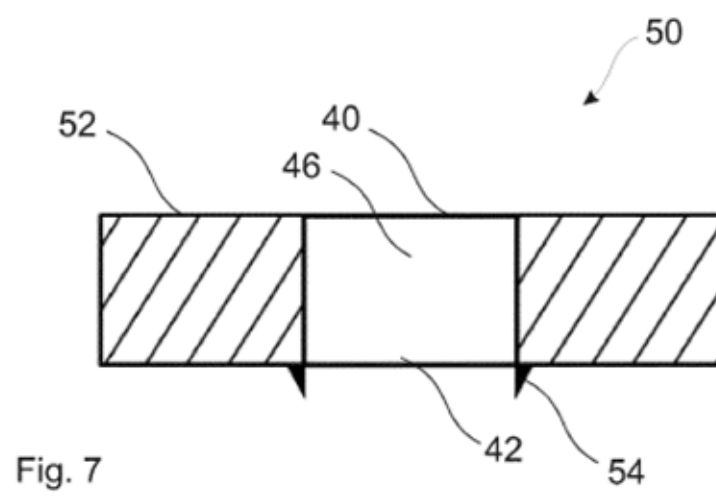


Fig. 7

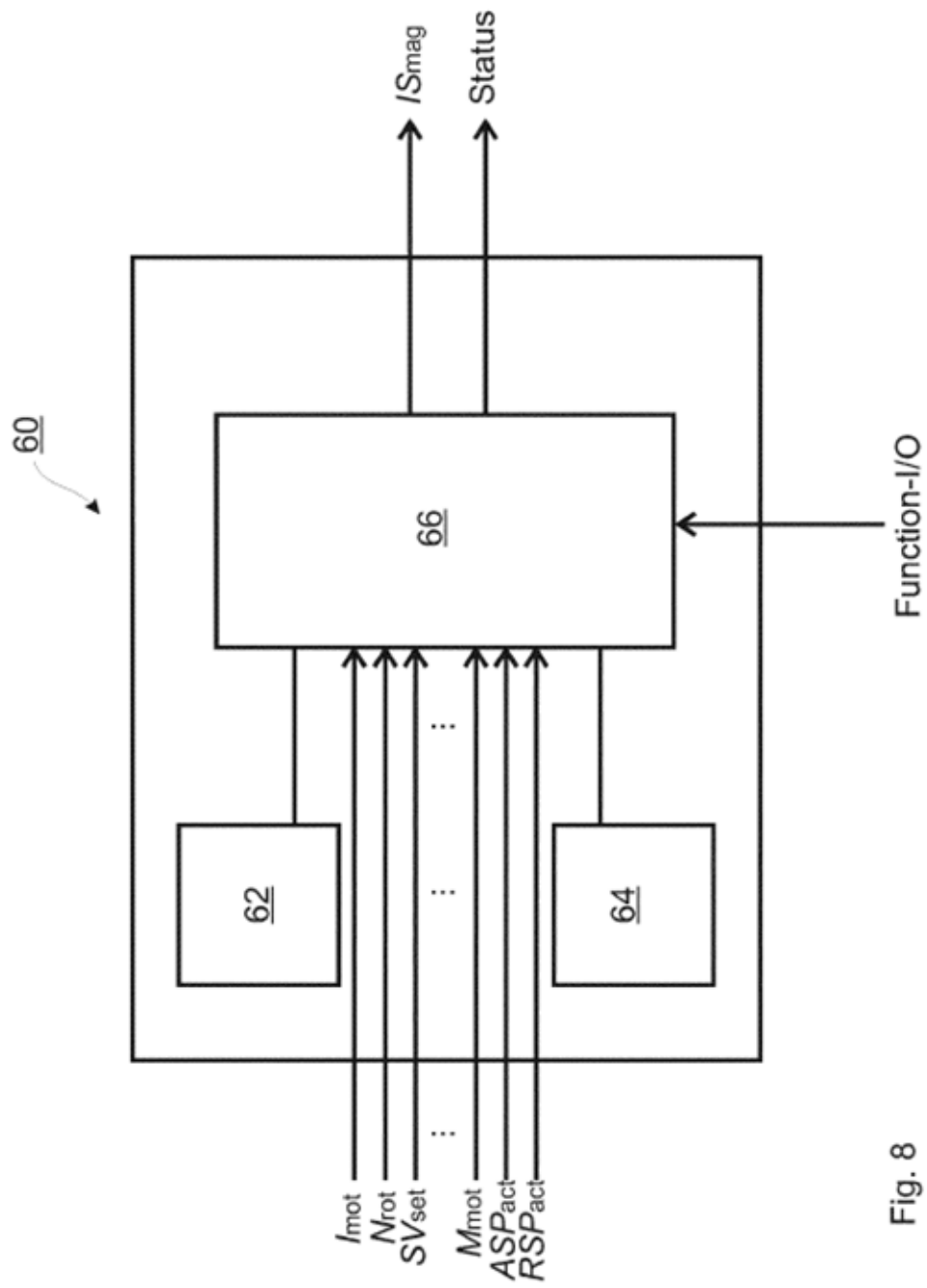


Fig. 8

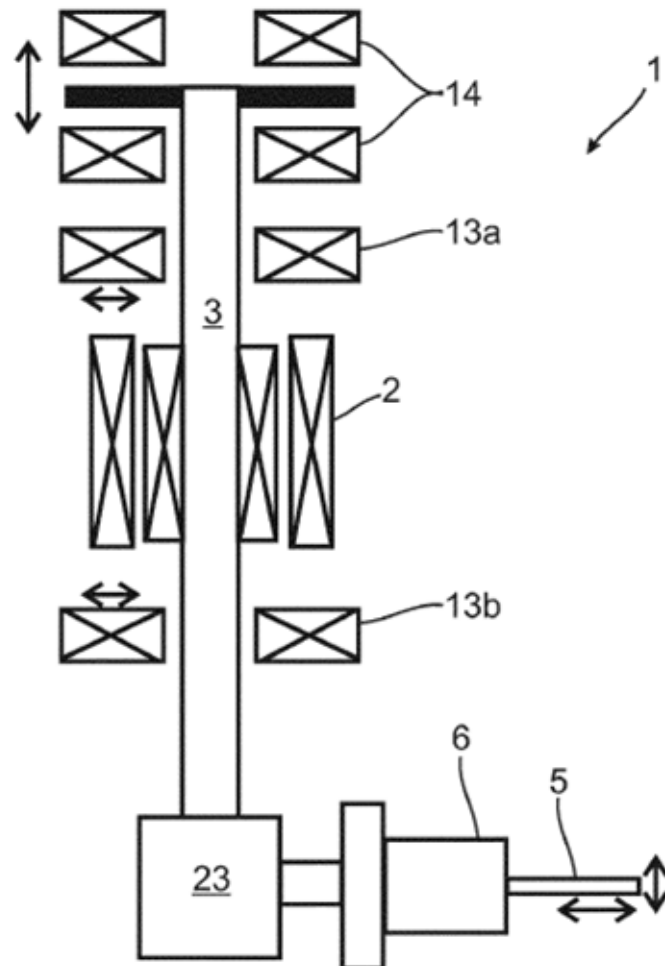


Fig. 9

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

Este listado de referencias citadas por el solicitante tiene como único fin la conveniencia del lector. No forma parte del documento de la Patente Europea. Aunque se ha puesto gran cuidado en la compilación de las referencias, no pueden excluirse errores u omisiones y la EPO rechaza cualquier responsabilidad en este sentido.

Documentos de patentes citados en la descripción

- DE 102009027688 A1 [0005]
- DE 10343682 A1 [0006]
- US 20130051946 A1 [0008]
- DE 102005030724 A1 [0012]
- DE 202007010866 U1 [0013] [0015]
- DE 102006036004 A1 [0013]
- DE 102006036004 A [0013]
- US 8694133 B2 [0014]
- US 7587965 B2 [0014]
- DE 3421973 A1 [0015]
- DE 102005051909 C5 [0015]
- AT 513094 B1 [0015]
- US 5997223 A [0016]
- US 4180946 A [0017]
- US 2013257206 A1 [0018]
- DE 102011080796 A1 [0019]
- EP 1724502 A2 [0020]

Bibliografía no especificada en la descripción de la patente

- **GERHARD SCHWEITZER.** Magnetlager: Grundlagen, Eigenschaften und Anwendungen Berührungsfreier, Elektromagnetischer Lager. Springer Verlag Taschenbuch, 27. April 1993 [0009]