

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 914 505**

51 Int. Cl.:

**B24C 3/32**

(2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.05.2019** **PCT/EP2019/063055**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.12.2019** **WO19228852**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.05.2019** **E 19724521 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.03.2022** **EP 3801986**

54 Título: **Procedimiento para un mecanizado hidroerosivo de componentes**

30 Prioridad:

**01.06.2018 EP 18175530**

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

**13.06.2022**

73 Titular/es:

**BASF SE (100.0%)**  
**Carl-Bosch-Strasse 38**  
**67056 Ludwigshafen am Rhein, DE**

72 Inventor/es:

**WEICKERT, MATHIAS**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 914 505 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

Procedimiento para un mecanizado hidroerosivo de componentes

La presente invención hace referencia a un procedimiento para el mecanizado hidroerosivo de componentes, en el cual un líquido que contiene partículas abrasivas fluye sobre las superficies del componente.

- 5 Un procedimiento de este tipo según el concepto general de la reivindicación 1 se conoce de la solicitud EP 1 787 753 A1.

Los procedimientos de rectificado hidroerosivo son procedimientos de mecanizado en los cuales un líquido que contiene partículas abrasivas fluye sobre una superficie a mecanizar. Las partículas abrasivas contenidas en el líquido golpean la superficie del componente a mecanizar durante el desbordamiento, por lo cual la correspondiente superficie es desgastada por erosión mediante las partículas abrasivas que desprenden material del componente al impactar sobre él. Dependiendo de la geometría, en particular, de la distribución de forma y tamaño de las partículas abrasivas, resulta posible un mecanizado muy fino de las superficies y en particular también el tratamiento de estructuras muy finas. Los procedimientos de rectificado hidroerosivo se pueden utilizar, por ejemplo, para tratar las superficies de componentes impresos en 3D fabricados de metal, cerámica y/o plástico que presentan una rugosidad superficial de entre 50 y 500 mm. Esta rugosidad de la superficie provoca efectos no deseados cuando se utilizan los componentes correspondientes, como el ensuciamiento o elevada pérdida de presión. Para poder mantener la geometría exacta dentro de las tolerancias de error tras el proceso de rectificado, es posible que la geometría del componente deba modificarse durante el proceso de fabricación, especialmente, durante la fabricación mediante un proceso de impresión 3D, y el proceso de rectificado debe poder ajustarse de forma precisa y controlada.

20 De la solicitud WO 2014/000954 A1 se conoce, por ejemplo, cómo utilizar un procedimiento hidroerosivo para redondear orificios en boquillas de inyección en válvulas de inyección para motores de combustión interna para rectificar así transiciones afiladas en orificios muy pequeños a través de los cuales se inyecta el combustible a alta presión en el motor de combustión interna. Para el procedimiento, un líquido que contiene partículas abrasivas fluye a través de la boquilla de inyección. Para un flujo uniforme a través del orificio de la boquilla de inyección y, por lo tanto, un redondeo uniforme de los bordes, se inserta un cuerpo hueco en la válvula de inyección y el líquido que contiene las partículas abrasivas pasa a través del conducto de flujo interior conformado en el cuerpo hueco y un conducto de flujo exterior conformado entre el cuerpo hueco y la pared interior de la válvula de inyección. Aquí, para un resultado uniforme, es posible utilizar diferentes líquidos que contienen partículas abrasivas que fluyan a través del conducto de flujo interno y externo y/o guiar el líquido que contiene partículas abrasivas a través del conducto de flujo interno y externo a diferentes caudales o presiones.

Una simulación matemática de la rectificación hidroerosiva se describe, por ejemplo, en P.A. Rizkalla, "Development of a Hydroerosion Model using a Semi-Empirical Method Coupled with an Euler-Euler Approach" (Desarrollo de un modelo de hidroerosión utilizando un método semiempírico acoplado con un enfoque de Euler-Euler), disertación, Instituto de Tecnología Royal Melbourne, Universidad de Melbourne, noviembre de 2007, páginas 36-44.

35 La desventaja de los procedimientos conocidos del estado del arte consiste en que, especialmente, en el caso de superficies a rectificar en las cuales existen obstáculos de flujo, por ejemplo, en forma de un elemento fijado a la superficie, o en el caso de componentes en los cuales el líquido que contiene partículas abrasivas debe desviarse, por ejemplo, cuando la superficie a rectificar es un orificio que desemboca en un conducto, como también es el caso de las boquillas de inyección descritas en la solicitud WO 2014/000954 A1, pueden producirse remolinos y reflujos, lo que puede resultar en una rectificación desigual o que algunos puntos permanezcan sin mecanizar.

Por lo expuesto, el objeto de la presente invención consiste en proporcionar un procedimiento para el mecanizado hidroerosivo de superficies, en el cual se asegura el mecanizado controlado de la superficie.

45 Dicho objeto se resuelve mediante un procedimiento para el mecanizado hidroerosivo de componentes, en el cual un líquido que contiene partículas abrasivas fluye sobre las superficies del componente, en un dispositivo con un conducto a través del cual el líquido que contiene partículas abrasivas fluye a presión; y en el cual se aloja el componente a mecanizar; y en el cual aguas arriba del componente en el sentido del flujo se coloca una válvula, con la cual se puede ajustar el flujo del líquido, en donde dicho procedimiento comprende los siguientes pasos:

(a) cerrar la válvula aguas arriba del componente y generar una presión predeterminada en el líquido que contiene las partículas abrasivas;

50 (b) abrir la válvula aguas arriba del componente y ajustar un primer caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas, que es entre un 5 % y un 80 % menor que el producto de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto sin que cambie la presión predeterminada generada en el paso del procedimiento (a);

(c) medir la diferencia de presión que se ajusta entre una posición aguas arriba del componente a mecanizar y una posición aguas abajo del componente a mecanizar en el líquido que contiene las partículas abrasivas;

5 d) aumentar el caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas hasta que el caudal volumétrico corresponda al producto de la superficie de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto, tan pronto como la diferencia de presión medida en el paso del procedimiento (c) haya disminuido entre un 5% y un 80%.

10 (e) Cerrar la válvula aguas arriba del componente y finalizar la circulación tan pronto como el caudal volumétrico en el paso del procedimiento (d) corresponda al producto de la superficie de sección transversal objetivo de flujo mínimo y la máxima velocidad admisible en este punto.

Al ajustar el caudal volumétrico entre un 5 % y un 80 % menor al producto de la superficie de la sección transversal objetivo de mínimo flujo y la velocidad máxima admisible en este punto sin que la presión predeterminada generada en el paso de procedimiento (a) cambie en el paso de procedimiento (b), se obtiene un desbordamiento homogéneo de la superficie a mecanizar, y se reducen los posibles reflujos, en los que la superficie se erosiona en exceso. No es posible evitar completamente los reflujos, ya que esto requeriría una velocidad de flujo tan baja que no se desgaste más material o que el proceso de rectificación se ralentice tanto que ya no sea posible una operación económica del procedimiento de rectificado. Las transiciones de bordes afilados se redondean mediante el rectificado, de modo que, debido al tratamiento, se mitiga la perturbación que causa el reflujo y los remolinos, lo que permite un aumento en el caudal volumétrico y en la velocidad del flujo. Otro aumento en el caudal volumétrico también resulta del aumento en la superficie de la sección transversal a través del cual pasa el flujo debido al proceso de rectificado, en el cual se elimina el material, por lo cual la superficie de la sección transversal aumentada ya requiere un aumento en el caudal volumétrico para mantener la velocidad del flujo constante.

Para el mecanizado hidroerosivo, primero, el componente se introduce en un conducto a través del cual fluye el líquido que contiene las partículas abrasivas. Cuando se deben mecanizar las superficies exteriores del componente, el componente se introduce en el conducto de tal manera que el líquido que contiene las partículas abrasivas pueda fluir sobre las superficies. Cuando se mecanizan superficies internas como, por ejemplo, orificios, el componente se conecta al conducto de tal manera que el líquido que contiene partículas abrasivas fluye a través de los orificios a mecanizar, por ejemplo, perforaciones, pero no entra en contacto con las superficies que no se deben mecanizar. Por ejemplo, en el componente pueden estar previstas conexiones adecuadas para el rectificado de perforaciones, a través de las cuales se alimenta el líquido que contiene las partículas abrasivas y sale de nuevo del componente.

Para evitar la cavitación, que puede conducir a un desgaste incontrolado de material y por lo tanto a la destrucción del componente, la presión del líquido que contiene las partículas abrasivas se aumenta al principio sin que el líquido fluya aún sobre las superficies a mecanizar. Para ello, en primer lugar se cierra una válvula en la dirección del flujo aguas arriba del componente a mecanizar. Cerrando la válvula y acumulando presión antes del comienzo de que el líquido que contiene partículas abrasivas fluya a través o alrededor del líquido al abrir nuevamente la válvula, es posible controlar el flujo de líquido que contiene partículas abrasivas de manera dirigida. El aumento de la presión puede evitar la cavitación, ya que la presión estática en el líquido, que disminuye debido a la alta velocidad, puede mantenerse por encima de la presión de vapor del líquido debido a la alta presión, evitando así que se conformen burbujas de vapor, que sean arrastradas con el flujo y colapsen repentinamente al llegar a zonas con mayor presión, lo que puede provocar una presión negativa local que puede derivar en daños en las superficies.

Para aumentar la presión del líquido que contiene partículas abrasivas cuando la válvula está cerrada en el paso del procedimiento (a), se puede utilizar, por ejemplo, una bomba situada aguas arriba de la válvula en la dirección del flujo. La presión que se genera en el líquido que contiene partículas abrasivas se ubica preferentemente en el rango de 1,1 a 500 bar (abs), en donde la presión depende del material del componente a mecanizar. Cuando se va a mecanizar una superficie de metal o cerámica usando el proceso de rectificado hidroerosivo, preferentemente se ajusta una presión en el rango de 10 a 500 bar (abs), más preferentemente de 10 a 200 bar (abs) y en particular, de 50 a 150 bar (abs), por ejemplo, de 100 bar (abs). En el caso de una superficie de plástico, la presión se ajusta preferentemente en un rango de 1,1 a 100 bar (abs), más preferentemente en el rango de 1,5 a 10 bar (abs) y en particular, en el rango de 1,5 a 3 bar (abs). Para medir la presión del líquido que contiene las partículas abrasivas en el paso del procedimiento (a), se utiliza preferentemente un primer sensor de presión, que se coloca entre la válvula aguas arriba del componente y la bomba con la cual se genera la presión y el flujo del líquido que contiene partículas abrasivas.

Como bomba para aumentar la presión y generar el caudal tan pronto como se abre la válvula aguas arriba del componente, resulta adecuada cualquier bomba con la cual se pueda aumentar la presión en el líquido que contiene partículas abrasivas sin que se vea afectada por las partículas abrasivas contenidas en el líquido. Tal daño a la bomba puede resultar, por ejemplo, del efecto abrasivo de las partículas, particularmente, en zonas con desviación

del flujo. Por lo tanto, las bombas de diafragma son particularmente preferidas como bombas para aumentar la presión en el líquido que contiene partículas abrasivas.

Después de aumentar la presión del líquido que contiene las partículas abrasivas, se abre la válvula aguas arriba del componente y se ajusta un primer caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas, que es entre un 5 % y un 80 % menor que el producto de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto sin que cambie la presión predeterminada generada en el paso del procedimiento (a). El caudal volumétrico se encuentra preferentemente entre un 10 y 40% y en particular un 15 y 25% menor que el producto de la superficie de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto. La superficie de la sección transversal que se genera mediante el proceso de rectificado hidroerosivo y que presenta el componente terminado se denomina como la superficie de la sección transversal objetivo; en donde la superficie de la sección transversal está orientada perpendicularmente a la dirección principal del flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas.

La velocidad máxima del líquido que contiene las partículas abrasivas es preferentemente de 1 m/s a 99% de la velocidad del sonido del líquido, preferentemente de 10 a 200 m/s y en particular de 50 a 150 m/s, por ejemplo, de 100 m/s. Ya que con un flujo volumétrico uniforme, la velocidad del líquido aumenta con una superficie de sección transversal decreciente por la cual fluye el flujo y de manera correspondiente, disminuye con una superficie de sección transversal creciente por la cual fluye el flujo; la velocidad máxima del líquido que contiene las partículas abrasivas se presenta en el punto donde el flujo atraviesa la mínima superficie de sección transversal. La velocidad hace referencia a la velocidad media del líquido sobre una sección de sección transversal, que se puede determinar, por ejemplo, midiendo el caudal volumétrico y dividiéndolo por la superficie de sección transversal.

Cuando se determina que a la velocidad ajustada del líquido que contiene las partículas abrasivas se produce cavitación, el caudal volumétrico se reduce hasta que ya no se detecte cavitación. Para detectar la cavitación, por ejemplo, se coloca un sensor de sonido en el conducto aguas abajo del componente. Debido a que las burbujas de vapor que se producen durante la cavitación y la presión negativa resultante generan ondas de sonido que producen un estallido, la cavitación se puede detectar fácilmente con el sensor de sonido. Cuando se conforma un gran número de burbujas y se produce una cavitación correspondientemente fuerte, los golpes de las burbujas individuales se condensan en un sonido de tableteo.

Debido al proceso de rectificado hidroerosivo, en el cual se elimina material de la superficie del componente a mecanizar con las partículas abrasivas contenidas en el líquido, la forma del componente cambia y la superficie de la sección transversal por la cual fluye el flujo aumenta. Esto conduce a una disminución de la pérdida de presión en el líquido que contiene las partículas abrasivas. Este descenso de la pérdida de presión se detecta en el paso del procedimiento (c). Para detectar la pérdida de presión, se determina preferentemente la diferencia de presión entre la presión en la dirección del flujo del líquido aguas arriba del componente y la presión en la dirección del flujo aguas abajo del componente. Para ello, la presión se puede medir con un segundo sensor de presión, que se coloca entre la válvula aguas arriba del componente y el componente, y un tercer sensor de presión, que se coloca aguas abajo del componente. A continuación, la presión medida aguas abajo del componente se resta de la presión medida aguas arriba del componente para obtener la diferencia de presión.

En el contexto de la presente invención, la información de ubicación "delante" y "detrás" siempre se refiere a la dirección del flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas durante el proceso de rectificación. "Delante..." por lo tanto siempre significa "aguas arriba en la dirección del flujo del líquido" y "detrás..." en consecuencia "aguas abajo en la dirección del flujo del líquido".

Debido a que, con el aumento de la duración del rectificado hidroerosivo, se eliminan los obstáculos de bordes afilados alrededor de los cuales se produce el flujo y se reduce el riesgo de conformación de remolinos con zonas de reflujo, el caudal volumétrico del líquido puede aumentar en el transcurso del proceso de rectificado. Además, el rectificado de bordes afilados y el aumento de la superficie de la sección transversal a través de la cual fluye el flujo debido al material eliminado por el desgaste conducen a un cambio en las condiciones del flujo en el líquido que contiene las partículas abrasivas, lo que reduce el efecto del rectificado. Por ello, de acuerdo con la invención, en el paso del procedimiento (d) el caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas aumenta hasta que el caudal volumétrico corresponda al producto de la superficie de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto, tan pronto como la diferencia de presión medida en el paso del procedimiento (c) haya disminuido entre un 5% y un 80%. El caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas se aumenta preferentemente en el paso del procedimiento (d) tan pronto como la diferencia de presión medida en el paso (c) haya disminuido entre un 10 y un 30 % y en particular, entre un 15 y un 25 %, por ejemplo, un 20 %.

El caudal volumétrico puede aumentar entonces en pasos individuales, en donde el caudal volumétrico aumenta en cada caso con una reducción de la pérdida de presión, o bien, el caudal volumétrico se incrementa de forma continua, constante y aumentando monótonamente en el paso (d). Se prefiere un aumento continuo, constante y

monótonamente creciente de la pérdida de presión, ya que cuando el caudal volumétrico aumenta en pasos individuales, se pueden provocar áreas de reflujo y, por lo tanto, cavitación.

- 5 La velocidad máxima admisible del flujo que contiene las partículas abrasivas es la velocidad a la que se desgasta la superficie de la manera deseada sin que se produzca un desgaste no deseado del material, por ejemplo, como resultado de reflujo o también como resultado de cavitación. La velocidad máxima admisible se puede determinar en este caso mediante pruebas preliminares. Sin embargo, alternativa y preferentemente la velocidad máxima admisible se determina mediante un cálculo de simulación.

- 10 Preferentemente, el caudal volumétrico se conduce tan rápido como para que no se exceda el tiempo de proceso previsto para el mecanizado del componente hasta alcanzar el caudal volumétrico máximo. El tiempo de proceso también se determina a través de pruebas preliminares o del cálculo de simulación. Además, a través de las pruebas preliminares o del cálculo de simulación también se puede ajustar una curva característica entre la pérdida de presión y el caudal volumétrico que muestra el desgaste. El desgaste en función de la pérdida de presión y el caudal volumétrico se puede leer en la curva característica y las condiciones requeridas para el desgaste deseado se pueden determinar a partir de la curva característica.

- 15 La simulación matemática que se describe a continuación para el paso (ii) también es adecuada para determinar la velocidad máxima cuando la velocidad máxima se debe determinar mediante una simulación y no mediante pruebas preliminares.

- 20 Para obtener una pieza terminada con las dimensiones deseadas, también resulta ventajoso cuando la geometría del componente también se modela en un cálculo de simulación antes del procedimiento de rectificado. Esto hace posible fabricar una pieza bruta para el componente que presenta una geometría tal que el componente presenta la geometría deseada dentro de las tolerancias predeterminadas después de que el material haya sido eliminado mediante el rectificado hidroerosivo. Este tipo de procedimiento de simulación adecuado para determinar la geometría de la pieza bruta del componente, que se conforma en la pieza terminada en un proceso de rectificado hidroerosivo, presenta, por ejemplo, los siguientes pasos:

- 25 (i) crear de un modelo estructural de la pieza terminada a fabricar, en donde para la primera implementación del siguiente paso

(ii) se utiliza como modelo de partida el modelo estructural de la pieza terminada a fabricar; (ii) Simulación matemática del proceso de rectificado hidroerosivo, con lo cual, a partir de un modelo de partida, se genera un modelo intermedio con una geometría modificada;

- 30 (iii) comparar el modelo intermedio generado en el paso (ii) con el modelo estructural de la pieza terminada y determinar la distancia ortogonal a la superficie del modelo estructural de la pieza terminada entre el modelo estructural de la pieza terminada a fabricar y el modelo intermedio en cada nodo del modelo estructural y comparar la distancia ortogonal con un valor límite predeterminado;

- 35 (iv) crear un modelo modificado del componente agregando del 5 al 99% de la distancia de signo opuesto determinada en el paso (iii) en cada nodo en la superficie del modelo utilizado como modelo de partida en el paso (ii), ortogonal a la superficie; y repetir los pasos (ii) a (iv), en donde el modelo modificado creado en el paso (iv) se utiliza como nuevo modelo de partida en el paso (ii) cuando la distancia ortogonal determinada en el paso (iii) es mayor en al menos un nodo al valor límite predeterminado;

- 40 (v) finalizar la simulación cuando la distancia ortogonal entre el modelo estructural de la pieza terminada y el modelo intermedio determinada en el paso (iii) cae por debajo de un valor límite predeterminado en cada nodo, en donde el modelo de partida del paso del procedimiento (b) realizado en último lugar corresponde a la geometría a determinar de la pieza en bruto.

- 45 Con este procedimiento se puede determinar la geometría dentro de una tolerancia predeterminada de la pieza terminada, que debe presentar una pieza bruta para que el proceso de rectificado hidroerosivo que se realiza produzca la pieza moldeada deseada.

Para la generación del modelo estructural de la pieza terminada a fabricar, preferentemente se genera primero una imagen tridimensional de la pieza terminada deseada con cualquier programa de diseño asistido por ordenador (programa CAD).

Al crear la imagen tridimensional de la pieza terminada deseada, se debe tener cuidado de asegurar que la misma refleje la pieza terminada deseada exactamente a escala. La imagen creada de esta manera se transfiere luego al modelo estructural. Para el modelo estructural, se coloca una cuadrícula sobre la imagen de la pieza terminada. Es importante asegurarse de que los nodos individuales de la cuadrícula, es decir, los puntos en los cuales al menos dos líneas de la cuadrícula se tocan en un ángulo distinto a 180°, se seleccionen de tal manera que el modelo estructural aún reproduzca la pieza terminada deseada con suficiente precisión. Particularmente en estructuras pequeñas, como radios pequeños o curvaturas, la distancia entre dos nodos debe ser lo suficientemente pequeña como para describir la geometría con precisión. Debido a que en los puntos del componente en los cuales se perturba el flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas, por ejemplo, en elevaciones o depresiones en la superficie, el flujo que se modifica conduce a un efecto modificado de las partículas abrasivas en la superficie, la distancia entre los nodos individuales también se debe seleccionar lo suficientemente pequeña en dichos puntos. La distancia entre los nodos a seleccionar depende del tamaño del componente a mecanizar y de las tolerancias dimensionales requeridas de la pieza terminada. Cuanto mayores sean las tolerancias dimensionales, mayor será la distancia entre dos nodos. A medida que aumenta la distancia desde la superficie a mecanizar, también puede aumentar la distancia entre dos nodos. Cuando se usa un programa de simulación para el cálculo en el paso del procedimiento (ii) que también permite la creación de una imagen de la pieza terminada, por supuesto se puede usar el mismo programa para crear la imagen y generar el modelo estructural a partir de la imagen.

Un experto sabe cómo se construye un modelo estructural adecuado; en donde para crear el modelo estructural se pueden utilizar programas de simulación convencionales, los cuales por lo general también incluyen módulos para generar el modelo estructural. Dependiendo del procedimiento de cálculo deseado en el paso (ii), se pueden utilizar programas de simulación que trabajen con diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos. Es habitual y se prefiere el uso de programas de simulación basados en elementos finitos, como los que ofrece ANSYS®.

En el paso del procedimiento (ii), el proceso de rectificado hidroerosivo se simula matemáticamente a partir de un modelo de partida, en donde mediante la simulación matemática se genera un modelo intermedio. Para la simulación matemática del proceso de rectificado hidroerosivo, por un lado, se simula matemáticamente el flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas y, por otro lado, el transporte de las partículas abrasivas en el líquido y el impacto asociado de las partículas abrasivas en el componente a mecanizar y la remoción de material resultante. Para el cálculo se pueden utilizar programas de simulación disponibles en el mercado. Un posible modelo para el proceso de rectificado hidroerosivo se describe, por ejemplo, en P.A. Rizkalla, "Development of a Hydroerosion Model using a Semi-Empirical Method Coupled with an Euler-Euler Approach" (Desarrollo de un modelo de hidroerosión utilizando un método semiempírico acoplado con un enfoque de Euler-Euler), disertación, Instituto de Tecnología Royal Melbourne, Universidad de Melbourne, noviembre de 2007, páginas 36-44. Sin embargo, además de la simulación matemática descrita aquí, también se puede utilizar cualquier otra simulación matemática del procedimiento de rectificado conocida por los expertos en la materia, con lo cual se describa la eliminación y la forma de la eliminación de material de una superficie con las partículas abrasivas contenidas en el líquido.

Como ya se ha descrito previamente, la simulación matemática se puede realizar utilizando un procedimiento de diferencias finitas, un procedimiento de elementos finitos o un procedimiento de volumen finito, en donde los programas de simulación comerciales usan generalmente procedimientos de elementos finitos.

Los datos de proceso que corresponden al proceso de fabricación previsto más tarde se utilizan como condiciones límite y datos de materiales para la simulación matemática. Los datos del material utilizados para la simulación matemática también deben corresponder a los del proceso de fabricación posterior previsto. Como condiciones límite para la simulación matemática del proceso de rectificado hidroerosivo, se utilizan, por ejemplo, la presión, la temperatura y el caudal volumétrico del líquido utilizado, que contiene las partículas abrasivas. Los datos del material del líquido que contiene las partículas abrasivas que se utilizan para la simulación matemática consisten, por ejemplo, en la viscosidad del líquido y la densidad del líquido, otros datos de material son la forma, el tamaño y el material de las partículas abrasivas, así como, la cantidad de partículas abrasivas en el líquido. Otros datos del proceso son la forma geométrica del componente, que se utiliza como modelo estructural, y la forma geométrica de los conductos a través de los cuales se transporta el líquido que contiene las partículas abrasivas. Otra variable de proceso que se utiliza para la simulación matemática es la duración del procedimiento de rectificado.

Los cambios en las condiciones del proceso durante la ejecución del procedimiento de rectificado hidroerosivo, por ejemplo, la presión o la temperatura del líquido que contiene las partículas abrasivas y, en particular, el caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas, también son considerados correspondientemente en la simulación matemática del procedimiento de rectificado. Además de los cambios en el caudal volumétrico y la presión, los cambios en las condiciones del proceso también afectan los cambios en la geometría durante el procedimiento de rectificado.

A través de la simulación matemática del procedimiento de molienda hidroerosivo en el paso (ii), el modelo intermedio presenta una geometría que se corresponde con la geometría que resulta cuando el modelo de partida se somete al proceso de rectificado hidroerosivo. Debido a que el modelo estructural de la pieza terminada se utiliza como modelo de partida cuando se realiza el paso (ii) por primera vez, el modelo intermedio determinado cuando se

realiza por primera vez el paso (ii) presenta una forma en la cual la superficie mecanizada se ha modificado de tal manera que el modelo intermedio generado refleja un componente del que se rectificaron las superficies a partir de la parte terminada. El modelo intermedio presenta así una geometría que se desvía de la geometría deseada de la pieza terminada, en esencia exactamente opuesta a la forma que se requiere como modelo de partida para obtener la pieza terminada deseada al final del proceso de rectificado.

Para aproximar la forma de la pieza bruta necesaria para obtener la pieza terminada deseada dentro de las tolerancias requeridas, en el paso del procedimiento (iii) se compara el modelo intermedio generado en el paso (ii) con el modelo estructural de la pieza terminada y se determina la distancia ortogonal a la superficie del modelo estructural de la pieza terminada entre el modelo estructural de la pieza terminada a fabricar y el modelo intermedio en cada nodo del modelo estructural. Esta distancia ortogonal, determinada en cada nodo, se compara con un valor límite predeterminado. El valor límite predeterminado consiste preferentemente en la tolerancia dimensional de la pieza terminada.

Cuando la distancia ortogonal entre el modelo estructural de la pieza terminada y el modelo intermedio determinado en el paso (ii) es mayor que el valor límite predeterminado en al menos un nodo, se realiza el paso del procedimiento (iv) y cuando la distancia ortogonal entre el modelo estructural de la pieza terminada y el modelo intermedio determinado en el paso (ii) es menor que el valor límite predeterminado en todos los nodos, entonces, se realiza el paso (v) y finaliza el procedimiento.

En el paso del procedimiento (iv), se crea un modelo modificado del componente, en donde se agrega del 5 al 99 % de la distancia determinada en el paso (iii), preferentemente, del 30 al 70 % de la distancia ortogonal determinada en el paso (iii) y en particular, del 40 al 60 %, por ejemplo, el 50 % de la distancia determinada en el paso (iii) ) con el signo opuesto, a cada nodo en la superficie del modelo utilizado como modelo de partida en el paso (ii) ortogonalmente con respecto a la superficie del modelo de partida. A continuación se repiten los pasos (ii) a (iv), en donde el modelo modificado creado en el paso (iv) se utiliza como el nuevo modelo de partida en el paso (ii). Debido al hecho de que se adiciona del 5 al 99 %, preferentemente del 30 al 70 %, en particular, del 40 al 60 %, por ejemplo, el 50 % de la distancia ortogonal determinada en el paso (iii) y no de toda la distancia ortogonal determinada en el paso (iii), al modelo de partida utilizado en el paso (ii), se garantiza que el proceso converge y que en cada caso, se obtiene una geometría para la pieza bruta, a partir de la cual se produce la pieza terminada en el proceso de rectificado hidroerosivo.

Al comparar el modelo intermedio generado en el paso del procedimiento (ii) con el modelo estructural de la pieza terminada en el paso (iii), la distancia ortogonal se registra en cada paso, lo que conduce a una desviación del modelo de partida de la pieza terminada. Al agregar una parte de esta distancia ortogonal al modelo de partida en el paso del procedimiento (ii) para crear un nuevo modelo de partida para el desarrollo posterior de los pasos (ii) a (iv), la forma de la pieza en bruto requerida se aproxima cada vez más en cada paso. Este proceso iterativo da como resultado la forma requerida de la pieza en bruto para la fabricación de la pieza terminada mediante un procedimiento de rectificado hidroerosivo tan pronto como el modelo intermedio generado en el paso del procedimiento (ii) presenta una distancia ortogonal al modelo estructural de la pieza terminada en cada nodo, que sea menor que el valor límite predeterminado. En este caso, la forma de la pieza en bruto es reproducida a través del modelo de partida en el paso del procedimiento (ii), en el cual como modelo intermedio se genera el modelo, cuya superficie corresponde a la pieza terminada dentro de las tolerancias especificadas, es decir, dentro de los valores límite predeterminados.

Dependiendo de la pieza terminada a producir, las tolerancias requeridas y, por lo tanto, los valores límite predeterminados pueden ser los mismos en toda la superficie a mecanizar de la pieza terminada a fabricar. Sin embargo, también resulta posible especificar diferentes tolerancias para diferentes superficies o diferentes áreas de la superficie de la pieza terminada, con lo cual después también resultan diferentes valores límite para la distancia ortogonal entre el modelo intermedio del paso (ii) y el modelo estructural de la pieza terminada.

Con el procedimiento de rectificado hidroerosivo, se pueden procesar superficies en el exterior del componente así como superficies en el interior del componente. Las superficies restantes dentro de un componente consisten, por ejemplo, en perforaciones o canales que se introducen a través del componente. El procedimiento de rectificado hidroerosivo se utiliza en particular cuando las superficies a mecanizar no se pueden alcanzar con herramientas convencionales, por ejemplo, cuando un orificio se ramifica desde un conducto o una perforación en un componente y los bordes de entrada en el orificio se deben redondear, o cuando hay un espacio en el interior de un obstáculo del flujo, por ejemplo, en forma de una constricción transversal, o un conducto se conduce alrededor de una o más esquinas.

Cuando las superficies externas del componente se van a mecanizar mediante el procedimiento de rectificado hidroerosivo, el componente se coloca preferentemente dentro del conducto para que el líquido que contiene partículas abrasivas pueda fluir sobre las superficies externas. Para ello, el componente se sujeta preferentemente en el conducto con elementos de sujeción adecuados, por ejemplo, varillas. Alternativamente, también resulta

posible colocar el componente en un soporte adecuado a través del cual pueda fluir el líquido y en que se une el conducto a ambos lados del componente con un acoplamiento adecuado, por ejemplo, una brida. Una colocación así del componente en el conducto también resulta posible cuando las superficies interior y exterior del componente se van a mecanizar mediante hidroerosión. En este caso, se debe prestar especial atención al hecho de que los orificios de entrada para el líquido que contiene partículas abrasivas en el componente estén alineadas de tal manera que el líquido fluya a través del componente a una velocidad suficientemente alta y sea posible así mecanizar las superficies internas.

Alternativamente, también resulta posible cerrar primero todos los orificios del componente y mecanizar sólo las superficies exteriores y después conectar el componente a un conducto de tal manera que solo se aplique líquido a las superficies internas. En correspondencia, el componente está conectado a un conducto de tal manera que sólo se afecta a las superficies interiores cuando no se van a procesar superficies exteriores.

En el caso de que se deban mecanizar tanto superficies internas como externas, por supuesto también es posible mecanizar primero las superficies internas y después, tras cerrar los orificios en el componente, las superficies externas.

El componente para el mecanizado de superficies interiores se puede conectar, por ejemplo, como se describe en la solicitud WO 2014/000954 A1. Alternativamente, el conducto a través del cual fluye el líquido que contiene las partículas abrasivas se puede conectar a un orificio de entrada del componente y a un orificio de salida del componente, de modo que el líquido que contiene las partículas abrasivas salga del conducto a través del orificio de entrada hacia el orificio del componente a mecanizar, en el componente fluya sobre las superficies a procesar y después regrese al conducto a través del orificio de salida.

Para poder ajustar con precisión el flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas, en particular, el caudal volumétrico y la pérdida de presión deseada a través del componente, se prefiere particularmente cuando, además de la válvula aguas arriba del componente, se coloca una segunda válvula aguas abajo del componente. El flujo volumétrico y la presión en el líquido que contiene las partículas abrasivas se ajustan entonces mediante la primera y la segunda válvula. En particular, la válvula aguas abajo del componente permite que la presión en el líquido del componente se mantenga tan alta que no se produzca cavitación. Para ello, la válvula aguas abajo del componente sólo se abre hasta que con la bomba se pueda mantener la presión deseada. Esta presión se mide con el tercer sensor de presión ubicado aguas abajo del componente. Para ello, el tercer sensor de presión está situado entre el componente y la válvula aguas abajo del componente.

Tan pronto como el caudal volumétrico en el paso del procedimiento (d) corresponda al producto de la superficie de la sección transversal objetivo de flujo pasante mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto, el mecanizado del componente está completo y el caudal del líquido que contiene las partículas abrasivas se detiene. Cuando sólo se proporciona una válvula aguas arriba de la componente, dicha válvula se cierra para este propósito. Cuando existe una válvula aguas arriba del componente y una segunda válvula aguas abajo del componente, antes del cierre de la válvula aguas arriba del componente en el paso del procedimiento (e), se cierra la segunda válvula aguas abajo del componente.

Cuando mecanizando el componente de la manera descrita, no es posible alcanzar todos los puntos de la superficie a mecanizar, es posible colocar el componente en el conducto para que el líquido que contiene las partículas abrasivas afecte las superficies a mecanizar en una dirección diferente de la primera dirección, por ejemplo, en la dirección opuesta. Alternativamente, también es posible mantener el componente en la posición original en el conducto e invertir la dirección de flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas, de modo que fluya en la dirección opuesta sobre las superficies a mecanizar. Para ello, se utiliza una segunda bomba en el otro lado del componente, en donde, preferentemente, la bomba que no se requiere se evita con una derivación, o alternativamente se usa una bomba que puede invertir la dirección de transporte. Sin embargo, es preferible utilizar una segunda bomba.

Preferentemente, el líquido que contiene las partículas abrasivas se almacena en un recipiente de almacenamiento y vuelve a fluir al recipiente de almacenamiento después de haber fluido sobre las superficies del componente a mecanizar. De esta manera, el rectificado hidroerosivo continuo resulta posible sin la necesidad de proporcionar constantemente líquido que contenga partículas abrasivas frescas. Para eliminar el material eliminado del componente del líquido que contiene las partículas abrasivas, resulta ventajoso que las partículas abrasivas presenten propiedades físicas diferentes a las del material del componente. Por ejemplo, cuando el material del componente no es magnetizable, se pueden utilizar partículas abrasivas magnetizables para que las partículas abrasivas se puedan separar del material eliminado del componente con la ayuda de un imán. De manera correspondiente, en el caso de un material magnetizable, el material eliminado del componente se puede retirar del líquido de manera sencilla con un imán cuando las partículas abrasivas no son magnetizables. Alternativamente, también es posible una separación debido a la gravedad a diferentes densidades, o una separación con la ayuda de

filtros cuando las partículas del material separado del componente presenta un tamaño diferente al de las partículas abrasivas.

Alternativamente, también es posible el retorno de sólo una parte del líquido que contiene las partículas abrasivas al recipiente de almacenamiento y eliminar una parte del proceso para retirar también una parte del material separado con esta parte retirada. La parte eliminada se reemplaza después con líquido que contiene partículas abrasivas frescas.

Debido al gran esfuerzo que implica separar el material separado del componente en partículas muy pequeñas de las partículas abrasivas, que también son muy pequeñas, se prefiere particularmente reemplazar completamente el líquido que contiene las partículas abrasivas a intervalos predeterminados. Los intervalos especificados pueden depender, por un lado, del número de componentes mecanizados o, por otro lado, del período de uso del líquido que contiene las partículas abrasivas.

Para evitar una expansión repentina del líquido en el recipiente de almacenamiento, que posiblemente puede conducir a la evaporación, se prefiere cuando el líquido que contiene partículas abrasivas devuelto al contenedor de almacenamiento se expande antes de fluir al contenedor de almacenamiento. Para la expansión del líquido se puede usar, por ejemplo, un inductor o una válvula.

Para reducir la velocidad de entrada de las partículas abrasivas en el recipiente de almacenamiento, también resulta ventajoso aumentar la superficie de la sección transversal del conducto. En este caso se prefiere que la superficie de la sección transversal no aumente demasiado repentinamente, para evitar que se conformen fuertes remolinos en el líquido, lo que puede provocar daños en la pared del conducto como resultado de la abrasión con las partículas contenidas en el líquido. Cuando se utiliza un inductor o una válvula para expandir el líquido, también se prefiere que detrás del elemento de expansión esté previsto un cuarto sensor de presión, con el cual se mide la presión del líquido antes de que fluya hacia el recipiente de almacenamiento. Esta presión se usa preferentemente para controlar el elemento de expansión, de modo que el líquido siempre fluya de regreso al recipiente de almacenamiento dentro de un rango de presión predeterminado.

Para mantener las partículas abrasivas distribuidas uniformemente en el líquido, resulta ventajoso que el recipiente de almacenamiento presente un agitador con el cual se pueda agitar el líquido que contiene las partículas abrasivas.

Los aceites naturales o sintéticos, en particular los aceites hidráulicos o el agua son especialmente adecuados como líquido para el líquido que contiene las partículas abrasivas. Los aceites hidráulicos adecuados están disponibles comercialmente, por ejemplo, como Shell Morlina® 10-60 o Shell Clavus® 32.

El material utilizado para las partículas abrasivas depende del material del componente a mecanizar. Cuando el componente está fabricado de metal o cerámica, se utilizan preferentemente partículas abrasivas de carburo de boro o de diamante. En el caso de un componente de plástico son especialmente adecuadas las partículas abrasivas de carburo de boro, diamante, arena o silicio. La forma y el tamaño de las partículas abrasivas también dependen del material del componente a mecanizar y del acabado superficial deseado, en particular, de la rugosidad superficial deseada y del tamaño de la estructura a mecanizar. Las formas de partículas adecuadas para las partículas abrasivas son, en particular, partículas con bordes afilados, por ejemplo, partículas rotas. Las partículas abrasivas adecuadas presentan preferentemente una distribución de tamaño de 1 a 100 µm y, en particular, una distribución de tamaño de 1 a 10 µm.

Para limpiar el componente mecanizado de residuos de partículas abrasivas o material eliminado, por lo general, el componente se enjuaga después del procesamiento con el líquido que contiene las partículas abrasivas. Para ello, se puede utilizar agua o aceites, por ejemplo, aceites sintéticos o naturales. Se prefiere particularmente utilizar el mismo líquido de enjuague que se usó previamente para mecanizar el componente, sin que el líquido de enjuague contenga partículas abrasivas.

En la figura se representa un ejemplo de ejecución de la presente invención, y se explica en detalle en la siguiente descripción.

La única figura muestra un diagrama esquemático del proceso conforme a la presente invención.

Para el mecanizado mediante un procedimiento de rectificado hidroerosivo, un componente 1 se introduce en un conducto 3 a través del cual fluye un líquido que contiene partículas abrasivas. La colocación del componente 1 depende de la superficie a mecanizar. Cuando se van a mecanizar las superficies exteriores del componente, el componente 1 se introduce en el conducto 3 de tal manera que el líquido que contiene las partículas abrasivas pueda fluir sobre las superficies exteriores a mecanizar. Para ello, el conducto 3 está rodeado por todos los lados por una pared y el componente 1 se encuentra en el interior del conducto. A continuación, el componente 1 se fija en el conducto 3 con medios de fijación adecuados, por ejemplo, con varillas. Cuando se van a mecanizar superficies

internas, por ejemplo, de perforaciones o conductos en el componente 1, el conducto 3 se conecta al componente de tal manera que el líquido que contiene las partículas abrasivas fluya sobre las superficies internas del componente 1. Para ello, por ejemplo, el conducto 3 se puede conectar directamente al orificio, por ejemplo, a la perforación o al conducto en el componente 1, utilizando un acoplamiento adecuado.

5 Para poder ajustar el flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas, existe una primera válvula 5 en la dirección del flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas. Al principio, la primera válvula 5 está cerrada. Entonces, con una bomba 7, preferentemente con una bomba de diafragma, se aumenta la presión en el líquido que contiene las partículas abrasivas en el conducto 3 entre la bomba 7 y la primera válvula 5. La presión que se ajusta con la bomba 7 cuando se cierra la primera válvula 5 depende del material del componente a mecanizar. Cuando la  
10 superficie del componente 1 a mecanizar está fabricada de metal o cerámica, se acumula una presión en el rango de 10 a 500 bar (abs), más preferentemente, de 10 a 200 bar (abs) y en particular de 50 a 150 bar (abs) y en el caso de una superficie del componente 1 a mecanizar de un plástico, una presión en el rango de 1,1 a 100 bar (abs), más preferentemente en el rango de 1,5 a 10 bar (abs) y en particular, en el rango de 1,5 a 3 bar (abs). La presión que se obtiene con la bomba 7 cuando se cierra la primera válvula 5 se mide en este caso con el primer sensor de presión  
15 9.

Una vez que se ha acumulado la presión, la primera válvula 5 se abre parcialmente. La primera válvula 5 se abre preferentemente entre el 5 y el 80 %, más preferentemente entre el 10 y el 40 %, en particular, entre el 15 y el 25 %, por ejemplo, el 20 % de la superficie de la sección transversal máxima por la cual pasa el flujo en la válvula. A continuación se abre una segunda válvula 11, que se encuentra detrás del componente 1 a mecanizar en la  
20 dirección del flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas, en donde la segunda válvula 11 se abre tanto como se mantenga la presión generada por la bomba 7 y medida en el primer sensor de presión 9, y se ajusta un caudal volumétrico deseado del líquido que contiene las partículas abrasivas. El caudal volumétrico se mide entonces con un sensor adecuado 13, por ejemplo, con un sensor de caudal. El caudal volumétrico, que se ajusta con la primera válvula 5 y la segunda válvula 11, vale preferentemente del 5 al 80%, más preferentemente del 10 al  
25 40% y en particular del 15 al 15%, por ejemplo el 20% del producto de la superficie de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto.

Mientras el líquido que contiene las partículas abrasivas fluye sobre la superficie a mecanizar, se registra la diferencia de presión en el líquido que contiene las partículas abrasivas. Para ello, en la forma de ejecución aquí mostrada, delante del componente está dispuesto un segundo sensor de presión 15 y detrás del componente está  
30 dispuesto un tercer sensor de presión 17. El segundo sensor de presión 15 se encuentra preferentemente, como se muestra aquí, entre la primera válvula 5 y el componente 1, y el tercer sensor de presión 17 se encuentra entre el componente 1 y la segunda válvula 11. Para determinar la diferencia de presión, la presión medida en el tercer sensor de presión 17 se resta de la presión medida en el segundo sensor de presión 15.

El rectificado hidroerosivo redondea los bordes y las esquinas del componente. Además, engrosa la superficie de la sección transversal del flujo. Estos cambios en el componente conducen a una reducción en la diferencia de presión a un caudal volumétrico constante.  
35

Tan pronto como la diferencia de presión detectada entre el segundo sensor de presión 15 y el tercer sensor de presión 17 ha descendido entre 5 a 80 %, preferentemente de 10 a 30 %, en particular, de 15 a 25 %, por ejemplo, un 20 %, el caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas de abrasivas aumenta. Preferentemente, el  
40 caudal volumétrico aumenta de forma continua, constante y monótona hasta que el caudal volumétrico corresponde al producto de la superficie de la sección transversal objetivo de flujo mínimo en el componente y la velocidad máxima admisible. Tan pronto como se alcanza este valor, se detiene el flujo del líquido que contiene las partículas abrasivas, se apaga la bomba y se cierran primero la segunda válvula 11 y después la primera válvula 5.

Para evitar la cavitación durante el proceso de rectificado, que puede conducir a una eliminación de material no deseada y, por lo tanto, a dañar el componente, está previsto un sensor de sonido 19. Con el sensor de sonido, se pueden detectar ruidos no deseados en el líquido que fluye que contiene las partículas abrasivas, en particular, estallidos o tableteos causados por el colapso de las burbujas de vapor producidas por la cavitación. Tan pronto como los ruidos detectados por el sensor de sonido indican el inicio de la cavitación, el caudal volumétrico se reduce, lo que también reduce la tendencia a la cavitación. De esta manera, el procedimiento de rectificación hidroerosivo puede funcionar de tal modo que no se produzca cavitación y, por lo tanto, no se produzca una  
50 eliminación de material no deseada.

Durante el proceso de rectificado hidroerosivo, el líquido que contiene las partículas abrasivas se toma preferentemente de un recipiente de almacenamiento 21. El recipiente de almacenamiento 21 se puede equipar con un agitador para evitar la aglomeración y la sedimentación de las partículas abrasivas.

55 Después de fluir a través del componente, el líquido que contiene las partículas abrasivas regresa preferentemente al recipiente de almacenamiento 21 a través de una línea de retorno 23. Antes del ingreso en el recipiente de

almacenamiento, el líquido que contiene las partículas abrasivas se expande en un elemento de expansión 25. Como elemento de expansión 25 resulta adecuado, por ejemplo, un inductor o una válvula. Alternativamente, también resulta posible aumentar la sección transversal de flujo del conducto de retorno 23 para expandir el líquido que contiene las partículas abrasivas y reducir la velocidad. Cuando se utiliza un elemento de expansión controlable o regulable 25, resulta ventajoso medir la presión en el líquido que contiene las partículas abrasivas con un cuarto sensor de presión 27 y controlar y/o regular el elemento de expansión 25 con el cuarto sensor de presión 27, para introducir el líquido que contiene las partículas abrasivas en el recipiente de almacenamiento 21 a un caudal y/o a una presión que fluctúa dentro de los límites predeterminados para el control y/o la regulación.

Debido a que el líquido que contiene las partículas abrasivas lava el material extraído durante el mecanizado hidroerosivo del componente 1 y lo arrastra consigo, el líquido que contiene las partículas abrasivas se contamina con el material extraído. Para poder utilizar el líquido que contiene las partículas abrasivas durante un período de tiempo más largo, ahora es posible eliminar el material eliminado del líquido que contiene las partículas abrasivas a través de un proceso de separación adecuado. Para ello, se puede proporcionar un dispositivo adecuado para la separación en el conducto de retorno 23, o bien una parte del líquido que contiene las partículas abrasivas se toma del recipiente de almacenamiento 21 o del conducto de retorno 23 y se alimenta a una unidad de procesamiento en la cual el material eliminado se separa del líquido que contiene las partículas abrasivas y se elimina el líquido. El líquido que contiene las partículas abrasivas preparado de esta manera se puede conducir de regreso al recipiente de almacenamiento.

Alternativamente, también es posible eliminar parte del líquido del proceso y reemplazarlo con líquido fresco que contiene partículas abrasivas, ya sea de forma continua o a intervalos regulares, que dependerán de la proporción de material eliminado en el líquido que contiene las partículas abrasivas o que se seleccionan de manera constante. Además, también resulta posible determinar la proporción de material eliminado mediante exámenes continuos o exámenes a intervalos regulares predeterminados y, cuando se alcanza una proporción máxima predeterminada de material eliminado, reemplazar todo el líquido que contiene las partículas abrasivas con líquido fresco que contiene partículas abrasivas.

Además de la forma de ejecución que se muestra aquí con líquido de retorno que contiene partículas abrasivas, también es posible, como alternativa, realizar el rectificado hidroerosivo siempre con líquido fresco que contiene partículas abrasivas y eliminar el líquido que contiene partículas abrasivas del proceso después de que haya fluido sobre las superficies a mecanizar, para desecharlo o depurarlo.

#### Lista de símbolos de referencia

1 Componente

3 Conducto

5 Primera válvula

7 Bomba

9 Primer sensor de presión

11 Segunda válvula

13 Sensor para la medición del caudal volumétrico

15 Segundo sensor de presión

17 Tercer sensor de presión

19 Sensor de sonido

21 Recipiente de almacenamiento

23 Conducto de retorno

25 Elemento de expansión

27 Cuarto sensor de presión

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el mecanizado hidroerosivo de componentes, en el cual un líquido que contiene partículas abrasivas fluye sobre las superficies del componente (1), en un dispositivo con un conducto (3) a través del cual el líquido que contiene partículas abrasivas fluye a presión; y en el cual se aloja el componente a mecanizar (1); y en el cual aguas arriba del componente (1) en el sentido del flujo se coloca una válvula (5), con la cual se puede ajustar el flujo del líquido, caracterizado porque el procedimiento comprende los siguientes pasos :
  - (a) cerrar la válvula (5) aguas arriba del componente (1) y generar una presión predeterminada en el líquido que contiene las partículas abrasivas;
  - (b) abrir la válvula (5) aguas arriba del componente (1) y ajustar un primer caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas, que es entre un 5 % y un 80 % menor que el producto de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto sin que cambie la presión predeterminada generada en el paso del procedimiento (a);
  - (c) medir la diferencia de presión que se ajusta entre una posición aguas arriba del componente (1) a mecanizar y una posición aguas abajo del componente a mecanizar en el líquido que contiene las partículas abrasivas;
  - (d) aumentar el caudal volumétrico del líquido que contiene las partículas abrasivas hasta que el caudal volumétrico corresponda al producto de la superficie de la sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto, tan pronto como la diferencia de presión medida en el paso del procedimiento (c) haya disminuido entre un 5% y un 80%.
  - (e) Cerrar la válvula (5) aguas arriba del componente (1) y finalizar la circulación tan pronto como el caudal volumétrico en el paso del procedimiento (d) corresponda al producto de la superficie de sección transversal objetivo de flujo mínimo y la máxima velocidad admisible en este punto.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque en el paso (d) el caudal volumétrico se incrementa de forma continua, constante y aumentando monótonamente.
3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado porque la velocidad máxima admisible en el punto de la superficie de la sección transversal de flujo mínimo se encuentra en el rango de 1 m/s al 99% de la velocidad del sonido.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque la velocidad máxima admisible se determina mediante un cálculo de simulación.
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque en un cálculo de simulación se modela la forma del componente antes del procedimiento de rectificado.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque el componente (1) se coloca dentro del conducto (3) cuando se van a mecanizar las superficies exteriores, de modo que el líquido que contiene partículas abrasivas pueda fluir sobre las superficies exteriores.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado porque el componente (1) se inserta en el conducto (3) cuando se van a mecanizar las superficies exteriores, de tal manera que todo el líquido que contiene las partículas abrasivas fluye a través del interior del componente a mecanizar.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque en el conducto (3) detrás del componente (1) o sobre el componente (1) se coloca un sensor de sonido (19) para detectar la cavitación y en caso de que se produzca cavitación, reducir el caudal volumétrico hasta que ya no se detecte cavitación.
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque el líquido que contiene partículas abrasivas se deposita en un recipiente de almacenamiento (21) y regresa al recipiente de almacenamiento (21) después de fluir sobre las superficies de la pieza a mecanizar (1).
10. Procedimiento según la reivindicación 9, caracterizado porque el líquido que contiene partículas abrasivas se expande antes del ingreso al recipiente de almacenamiento (21).

11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado porque detrás del componente (1) se coloca una segunda válvula (11) y a través de la primera válvula (5) y de la segunda válvula (11) se ajusta el caudal volumétrico y la presión en el líquido que contiene las partículas abrasivas.
- 5 12. Procedimiento según la reivindicación 11, caracterizado porque antes de cerrar la válvula (5) aguas arriba del componente (1) en el paso del procedimiento (e), la segunda válvula (11) aguas abajo del componente (1) se cierra tan pronto como el flujo volumétrico en el paso del procedimiento (d) corresponde al producto de la superficie de sección transversal objetivo de flujo mínimo y la velocidad máxima admisible en este punto.
- 10 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado porque en el paso del procedimiento (a) se mide la presión del líquido que contiene partículas abrasivas con un primer sensor de presión (9) que se instala entre la válvula (5) aguas arriba del componente (1) y una bomba (7) con la cual se genera la presión y el caudal del líquido que contiene partículas abrasivas.
14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 13, caracterizado porque para determinar la diferencia de presión se mide la presión con un segundo sensor de presión (15) que se coloca entre la válvula (5) aguas arriba del componente (1) y el componente (1), y un tercer sensor de presión (17) colocado aguas abajo del componente (1).

Fig. 1

