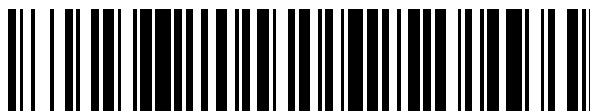


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 555 254**

51 Int. Cl.:

**B23H 7/20** (2006.01)

**B23H 1/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.12.2011** **E 11010308 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.09.2015** **EP 2610027**

54 Título: **Método y aparato para mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo)**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**30.12.2015**

73 Titular/es:

**AGIE CHARMILLES SA (100.0%)**  
**Via dei Pioppi 2**  
**6616 Losone, CH**

72 Inventor/es:

**MARADIA, UMANG;**  
**KNAAK, RETO y**  
**DAL BUSCO, WALTER**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 555 254 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

Método y aparato para mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo)

5 Campo de la Invención

La presente invención se refiere a un método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) y a un aparato para mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) semejante.

10 Antecedentes de la Invención

10 Generalmente, en el mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) conocido se aplica energía eléctrica en forma de impulsos eléctricos discretos través de un hueco de mecanizado lleno de un fluido de mecanizado o dieléctrico líquido (por ejemplo, aceite). Los impulsos eléctricos discretos originan una sucesión de descargas eléctricas entre un electrodo de herramienta y una pieza de trabajo. El espacio entre el electrodo de herramienta y la pieza de trabajo define el hueco de mecanizado, también denominado hueco de trabajo. Las descargas eléctricas provocan un arranque de material de la pieza de trabajo y, adicionalmente, desgaste del electrodo de herramienta.

15 Típicamente, a medida que se produce el arranque de material se hace avanzar el electrodo de herramienta con respecto a la pieza de trabajo por medios de servoalimentación. Se controla continuamente la distancia de hueco de trabajo en función de las condiciones instantáneas del proceso. Se compara una señal que representa la distancia de hueco de trabajo actual (por ejemplo, el retardo de ignición y/o la tensión media de hueco) con un valor que representa una distancia de hueco de trabajo deseada (valor de referencia), y se calcula el error resultante entre estos valores para generar un nuevo valor de mando para el motor de accionamiento con el fin de ajustar la distancia correcta de hueco de trabajo. De esta manera el control de la posición relativa de pieza de trabajo y electrodo permite la creación de descargas consecutivas para arranque de material.

20 El arranque de material y las descargas provocan una contaminación de la zona de hueco de mecanizado con restos de erosión, subproductos de proceso, productos de descomposición térmica del dieléctrico y gases. Es conocido eliminar tales contaminantes lavando la zona de hueco de mecanizado con líquido de mecanizado nuevo y retrayendo cíclicamente el electrodo de herramienta para alejarlo de la pieza de trabajo.

25 A partir del documento US 4,288,675 A es conocido emplear trenes de impulsos (descargas), consistente cada uno de ellos en múltiples impulsos de mecanizado, y variar la duración y/o el tiempo en apagado de trenes de impulsos consecutivos con el fin de reducir el desgaste de electrodo. La duración de impulso de cada impulso individual y el tiempo en apagado entre cada impulso individual del tren de impulsos se preestablecen antes del mecanizado y dependen, por ejemplo, de los materiales de electrodo. La duración o tiempo en encendido de un tren de impulsos y/o el tiempo en apagado entre trenes de impulsos consecutivos se ajustan durante el mecanizado en función de la velocidad detectada o el movimiento de avance relativo del electrodo de herramienta, a fin de mantener sustancialmente constante en un valor deseado la densidad de corriente a lo largo de las superficies de mecanizado a pesar de la variación del área de mecanizado durante el movimiento de avance relativo del electrodo de herramienta.

30 A partir del documento US 4,503,309 A es conocido emplear pulsos de corriente acrecentada de forma intermitente en un tren de impulsos con el fin de lograr la densidad de corriente deseada y aumentar la estabilidad del proceso. En un método según el documento US 5,369,239 A se utilizan elementos sensores externos para determinar la ubicación de chispas en esquinas y/o bordes con el fin de controlar la acumulación de grafito que da lugar a un subcorte durante el mecanizado.

35 Como se ha mencionado, típicamente el electrodo de herramienta es propenso al desgaste. Ya a partir del documento US 3,558,842 A se sabe que en condiciones específicas se forma una película protectora sobre el electrodo de herramienta durante un proceso de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo). La película protectora la forman, por ejemplo, productos del líquido de trabajo y/o productos resultantes de la descarga a través del hueco de mecanizado.

40 Se puede utilizar la formación de una película protectora para proteger el electrodo de herramienta y reducir así su desgaste. Por ejemplo, el artículo "Zero wear - The "Perpetuum Mobile" of die-sinking EDM", descargable de [http://www.gfac.com/fileadmin/user\\_upload/dev-agiecharmilles/News/Result\\_today\\_4/](http://www.gfac.com/fileadmin/user_upload/dev-agiecharmilles/News/Result_today_4/)

45 Results\_today\_04\_E\_article11.pdf, describe en la página 28 un mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) (MDE) en donde se utiliza un electrodo de grafito en MDE con penetración de matriz. El grafito no se funde, sino que sublima. Según este documento, en cuanto comienza el proceso de MDE, el material eliminado se desplaza junto con los productos de descomposición del dieléctrico con contenido de carbono al electrodo de grafito. Controlando la disminución de la temperatura durante el proceso, precipita carbono sobre la superficie del electrodo. De esta manera se forma una capa sobre el electrodo que protege al electrodo original. El proceso MDE se controla de manera tal que se compensan el crecimiento de la capa sobre el electrodo y el desgaste causado por impulsos de descarga que se produce en la capa protectora. Por tanto, se puede reducir el desgaste del electrodo.

Sin embargo, en particular en el caso del mesomecanizado y el micromecanizado, es decir, por ejemplo en la mesoescala (área de la superficie de electrodo de  $10 \text{ mm}^2$  a  $1 \text{ mm}^2$ ) y en la microescala (área de la superficie de electrodo entre  $1 \text{ mm}^2$  y  $0,001 \text{ mm}^2$  o dimensiones inferiores, con el electrodo por debajo de  $1 \text{ mm}$ ), también en los procesos de mecanizado antes mencionados el desgaste de electrodo es considerable.

5 Además, a partir de J. Valentinčič, M. Junkar, "On-line selection of rough machining parameters", Journal of Materials Processing Technology 149, 2004, págs. 256-262, se sabe que la tensión de descarga depende del tamaño de la superficie erosiva. A partir de J. Valentinčič, M. Junkar, "A model for detection of the eroding surface based on discharge parameters", Machine Tools & Manufacture, 44, 2004, 175-181, se sabe que la señal de corriente eléctrica  
10 depende del tamaño de la superficie erosiva. A partir de J. Valentinčič *et al.*, "Selection of optimal EDM machining parameters for the given machining surface", 8<sup>th</sup> International Conference on management of Innovative Technologies MIT, 2005, págs. 217-225, es conocida una selección en línea de los parámetros de mecanizado en función de la superficie de mecanizado dada.

15 Además, es conocido estimar a partir de la física de plasma de descarga el estado del canal de descarga. Por ejemplo, el documento US 4,376,880 A menciona el distinguir entre descargas normales y descargas indeseadas basándose en el estado del plasma de descarga.

20 A partir de P. Boddy, T. Utsumi, "Fluctuation of arc potential caused by metal-vapor diffusion in arcs in air", Journal of Applied Physics, vol. 42, n° 9, 1971, págs. 3369-3373, se sabe que la tensión de descarga indica distintos estados de plasma durante la apertura de contactos eléctricos en aire, un fenómeno similar al que se produce en el caso de descargas en dieléctricos líquidos.

25 Por tanto, es un objeto de la presente invención proporcionar un método mejorado para controlar un proceso de MDE y un aparato mejorado para mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo).

#### Compendio de la Invención

30 Según un primer aspecto, la invención proporciona un método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) que tiene al menos un electrodo de herramienta y una pieza de trabajo, según la reivindicación 1.

35 Según un segundo aspecto, la invención proporciona un aparato para mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) que comprende: un electrodo de herramienta, una mesa de trabajo para recibir una pieza de trabajo, un generador de impulsos para generar impulsos de descarga, y un control para controlar el aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo), en donde el control está adaptado para realizar el método del primer aspecto.

40 En las reivindicaciones dependientes, la descripción que sigue y los dibujos se exponen aspectos adicionales de la invención.

#### Breve descripción de los dibujos

Se explican a modo de ejemplo realizaciones de la presente invención con respecto a los dibujos adjuntos, en los cuales:

45 las Figuras 1a a 1d ilustran la determinación del área instantánea de la superficie erosiva de un electrodo de herramienta;

la Figura 2 muestra una realización de un aparato de mecanizado por descarga con penetración de matriz según la presente invención;

50 la Figura 3 muestra una tecnología de impulsos de descarga que se aplica en caso de que la descarga se produzca en una superficie a macroescala de un electrodo compuesto según la Figura 1c;

la Figura 4 ilustra un diagrama de flujo de una realización del método para controlar el aparato de MDE de la Figura 2;

las Figuras 5a y b muestran un método para medir tensión de descarga;

55 la Figura 6 ilustra la medición de tensiones de descarga para al menos dos áreas instantáneas de superficie distintas, cuyo resultado se introduce, en algunas realizaciones de la invención, para adaptar al menos dos diferentes tecnologías de proceso durante la erosión;

la Figura 7a ilustra la adaptación de la tecnología de proceso a la descarga eléctrica actual tras la medición de la tensión de descarga;

60 la Figura 7b ilustra la adaptación de la tecnología de proceso a la descarga o descargas actual y/o subsiguientes, basada en la medición de tensión de descarga;

la Figura 7c ilustra la adaptación de la tecnología de proceso en donde se aplica un tren de impulsos específico al hueco de mecanizado durante y/o después de la medición de tensión de descarga ilustrada en la Figura 6;

65 la Figura 7d muestra medidas para control de arco, de manera adicional o simultánea a la medición de tensión de descarga con vistas a la adaptación del control de proceso;

la Figura 8 ilustra una realización con un electrodo de herramienta que tiene una única área de superficie, en

donde se miden al menos dos tensiones de descarga distintas durante el mecanizado, que conducen a la adaptación adecuada de la tecnología;

la Figura 9 muestra diferentes grupos de tensión de descarga para los tipos de chispas e información de área instantánea de la superficie para una chispa dada;

la Figura 10 ilustra realizaciones de diferentes configuraciones de electrodos de herramienta;

las Figuras 11a a 11d muestran diferentes realizaciones de trenes de impulsos para patrones de impulsos de descarga según la presente invención, que se aplican en el caso de que la descarga se produzca en la estructura pequeña del electrodo compuesto ilustrado en la Figura 1c;

las Figuras 12a y 12b muestran un impulso de descarga largo y un impulso de descarga corto, respectivamente, con una sección de pendiente creciente;

las Figuras 13a y b ilustran diferentes tipos de estados de plasma de descarga y la correspondiente tensión media de descarga junto con las posibilidades de evolución temporal asociadas;

la Figura 14 muestra mediciones de tensión de descarga para diferentes fases de plasma de descarga durante la apertura de contactos eléctricos;

la Figura 15a ilustra tres distintas tensiones de descarga de una chispa durante el mecanizado por DE;

la Figura 15b ilustra un ejemplo de generación inestable de chispa; y

la Figura 16 muestra una realización en donde se aplican pulsos piloto y/o de exploración durante la erosión para determinar el área instantánea de la superficie sobre la que se están produciendo descargas eléctricas.

#### 20 Descripción detallada de realizaciones

La Figura 2 ilustra una realización de un aparato 1 de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) con penetración de matriz según la presente invención. Sin embargo, antes de continuar con la descripción detallada de la Figura 2 se discutirán algunos aspectos generales.

25 Como ya se ha mencionado al principio, en el mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) se aplica energía eléctrica en forma de impulsos eléctricos discretos través de un hueco de mecanizado lleno de un fluido de mecanizado

(por ejemplo aire, gases) o dieléctrico líquido (por ejemplo aceite dieléctrico, agua destilada). Los impulsos eléctricos discretos (también denominados "pulsos eléctricos" o "pulsos" en lo que sigue) originan una sucesión de descargas eléctricas entre un electrodo de herramienta y una pieza de trabajo. El espacio entre el electrodo de herramienta y la pieza de trabajo define el hueco de mecanizado, también denominado "hueco de trabajo" en lo que sigue. Las descargas eléctricas provocan un arranque de material de la pieza de trabajo y, adicionalmente, desgaste del electrodo de herramienta.

35 Típicamente, a medida que se produce el arranque de material se hace avanzar el electrodo de herramienta con respecto a la pieza de trabajo por medios de servoalimentación. Se controla continuamente la distancia de hueco de mecanizado en función de las condiciones instantáneas del proceso. Se compara una señal que representa la distancia de hueco de trabajo actual (por ejemplo, el retardo de ignición y/o la tensión media de hueco) con un valor que representa una distancia de hueco de trabajo deseada (valor de referencia), y se calcula el error resultante entre estos valores para generar un nuevo valor de mando para el motor de accionamiento con el fin de ajustar la distancia correcta de hueco de trabajo. De esta manera el control de la posición relativa de pieza de trabajo y electrodo permite la creación de descargas consecutivas para arranque de material.

45 El arranque de material y las descargas provocan una contaminación de la zona del hueco de mecanizado con restos de erosión, subproductos de proceso, productos de descomposición térmica del dieléctrico y gases. Es conocido eliminar tales contaminantes lavando la zona del hueco de mecanizado con líquido de mecanizado nuevo y retrayendo ciclicamente el electrodo de herramienta para alejarlo de la pieza de trabajo.

50 En algunas realizaciones, para un ciclo de mecanizado se definen diversos parámetros de la tecnología de proceso dentro de un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso. En algunas realizaciones, los parámetros de la tecnología de proceso se pueden agrupar principalmente en parámetros eléctricos y parámetros temporales para unas condiciones fijas de parámetros de material. Los parámetros eléctricos de la tecnología de proceso incluyen el tipo de pulso (corriente inicial, corriente final, trayecto seguido para el incremento de corriente), tensión abierta aplicada, picos de corriente, etc.

55 Los parámetros temporales incluyen duración de pulso, duración de pausa, trenes específicos de impulsos, intervalo de tiempo entre dos ciclos de lavado, etc. Los parámetros de proceso basados en el tipo de electrodo, materiales, dieléctrico, tipo de máquina, etc. se optimizan para lograr resultados óptimos del proceso. Los resultados del proceso incluyen principalmente velocidad de arranque de material, desgaste de electrodo de herramienta, calidad de superficie, precisión y exactitud de forma, necesidades de recursos, etc.

65 A partir del documento US 4,288,675 A, mencionado al principio, es conocido emplear trenes de impulsos (de descarga), consistente cada uno de ellos en múltiples impulsos de mecanizado, y variar la duración y/o el tiempo en apagado de trenes de impulsos consecutivos con el fin de reducir el desgaste de electrodo. La duración de impulso de cada impulso individual y el tiempo en apagado entre cada impulso individual del tren de impulsos se preestablecen antes del mecanizado y dependen, por ejemplo, de los materiales de electrodo. La duración o el

tiempo en encendido de un tren de impulsos y/o el tiempo en apagado entre trenes de impulsos consecutivos se ajustan durante el mecanizado en función de la velocidad detectada o el movimiento de avance relativo del electrodo de herramienta, a fin de mantener sustancialmente constante la densidad de corriente a lo largo de las superficies de mecanizado a pesar de la variación del área instantánea de mecanizado (véase más abajo) durante el movimiento de avance relativo del electrodo de herramienta. Este documento no se refiere ni al mecanizado en mesoescala ni al mecanizado en microescala ni, más en general, tampoco se refiere a la detección de la ubicación de chispas y una adaptación asociada de la tecnología de proceso.

A partir del documento US 4,503,309 es conocido emplear pulsos de corriente acrecentada de forma intermitente en un tren de impulsos con el fin de lograr la densidad de corriente deseada y aumentar la estabilidad del proceso. En un método del documento US 5,369,239 A se utilizan elementos sensores externos para determinar la ubicación de chispas en esquinas o bordes con el fin de controlar la acumulación de grafito que da lugar a subcorte durante el mecanizado.

Como se ha mencionado, típicamente el electrodo de herramienta es propenso al desgaste. Ya a partir del documento US 3,558,842 A se sabe que en condiciones específicas se forma una película protectora sobre el electrodo de herramienta durante un proceso de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo). La película protectora la forman, por ejemplo, productos del líquido de trabajo y/o productos resultantes de la descarga a través del hueco de mecanizado.

También en la física de descargas eléctricas se ha observado deposición de carbono sobre superficies de electrodo, especialmente para temperaturas que alcanzan por encima de 1.400°C, donde comienza la pirólisis del carbono. Dependiendo de la temperatura y la presión se acumula carbono a partir de productos de descomposición a través de pirólisis.

Se puede utilizar la formación de una película protectora para proteger el electrodo de herramienta y reducir así su desgaste. Por ejemplo, el artículo "Zero wear - The "Perpetuum Mobile" of die-sinking EDM" mencionado al principio, describe un mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) en donde se utiliza un electrodo de grafito en MDE con penetración de matriz.

En este método conocido se pueden utilizar trenes de impulsos que consisten, por ejemplo, en tres impulsos de descarga idénticos que tienen la misma duración de impulso y el mismo tiempo en apagado entre ellos. El tiempo en apagado entre los trenes de impulsos según este método es mayor que el tiempo en apagado entre los impulsos de descarga individuales de un tren de impulsos individuales.

Además, con este método no es posible aplicar una elevada corriente de descarga, por ejemplo por encima de 8 A, para electrodos compuestos (electrodos que tienen múltiples estructuras diferentes, por ejemplo en la mesoescala y la microescala), sin originar un elevado desgaste del electrodo de herramienta. Por lo tanto, con los métodos anteriores, la velocidad global de mecanizado es reducida.

El grafito no se funde, sino que sublima. Durante la descarga eléctrica, se forma carbono en forma de grafito en la superficie o superficies del electrodo. El tipo de grafito formado depende de las temperaturas implicadas en el proceso y del control de la corriente durante las descargas eléctricas. El carbono depositado sobre la superficie del electrodo (ánodo y/o cátodo) puede contener también productos de erosión o restos formados durante y al término de la descarga. De este modo se forma sobre el electrodo una capa de grafito y productos de erosión, entre ellos productos de descomposición del dieléctrico, que protegen el electrodo original. El proceso MDE es así controlado en algunas realizaciones de manera que se compensen el crecimiento de la capa sobre el electrodo y el desgaste originado por los impulsos de descarga que tienen lugar sobre la capa protectora. Por lo tanto, se puede reducir el desgaste del electrodo. El proceso se puede ver a varias escalas:

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| a nivel de microsegundos              | - cinética de reacción de plasma,   |
| a nivel de chispa única               | - cambio en la temperatura y presión con el transcurso del tiempo después de la interrupción, |
| a nivel de chispas múltiples          | - densidad media de corriente (factor de trabajo) y formación de trenes de impulsos, y        |
| a nivel de centenares de milisegundos | - intervalo de tiempo entre dos ciclos de lavado.   |
| a nivel de tiempo mucho mayor         | - profundidad de erosión y contaminación en la zona del hueco.                                |

En algunas realizaciones, el crecimiento de carbono sobre el electrodo de herramienta se puede caracterizar principalmente como crecimiento lateral y crecimiento frontal en función de la dirección del movimiento del electrodo de herramienta durante la erosión. Mediante el control de la corriente aplicada a la descarga eléctrica a través del hueco de mecanizado, también denominada "chispa" en lo que sigue, durante los pocos microsegundos iniciales

(1-30  $\mu$ s) de la chispa se puede reducir la elevada temperatura inicial sobre las superficies del electrodo mientras que el resto de la duración del pulso incrementa las temperaturas superficiales del electrodo, lo que conduce a la formación de carbono sobre la superficie o superficies del electrodo.

5 Como se ha mencionado antes, a temperaturas superiores a 1.400°C comienza la pirólisis del carbono, lo cual puede ser un factor primario para la formación de la capa protectora que contiene grafito y productos de erosión, sobre la superficie o superficies de electrodo. La capa formada puede ser porosa o bien puede ser incluso más dura que el material de base del electrodo de herramienta, protegiéndolo así contra las fuerzas térmicas y/o abrasivas que provocan típicamente el desgaste del electrodo de herramienta. En algunas realizaciones, la temperatura media  
10 de la superficie del electrodo de herramienta y de la zona de descarga se controla mediante el control de un factor de trabajo o una densidad media de corriente, mediante lo cual se puede controlar el volumen de la acumulación de carbono sobre el electrodo de grafito.

15 En algunas realizaciones, el nivel de corriente por chispa se puede regular con tres parámetros principales: corriente inicial (de 0,01 a 25 A), corriente final (de 0,1 a 120 A) y el trayecto entre ambas, es decir, diferentes pendientes o gradientes seguidas para el incremento de corriente. Por tanto, la velocidad a la cual se acumula el carbono depende de todos estos efectos, que incluyen también las propiedades de material del ánodo/cátodo, tales como calor específico, conductividad térmica y resistividad eléctrica. En algunas realizaciones, el perfil del incremento de corriente por chispa, la pendiente de corriente y la corriente inicial pueden reducir el desgaste del electrodo de herramienta y pueden aumentar el crecimiento radial de la capa protectora de carbono sobre la superficie del electrodo de herramienta. Además, el efecto de escala geométrica de la dimensión del electrodo desempeña un papel en la tasa de crecimiento de carbono y en las características de la acumulación de carbono.

20 Aunque sólo se menciona aquí el aspecto térmico, en algunas realizaciones la naturaleza del crecimiento de carbono también se puede atribuir a otros aspectos tales como campo electromagnético, deposición fisicoquímica de vapor, generación de puntos en el cátodo/ánodo, alta densidad de corriente (0,1-20 A o más) a lo largo del tiempo y/o área de la superficie, etc.

30 Sin embargo, en algunas realizaciones, en particular cuando la descarga eléctrica tiene lugar en las esquinas y bordes del electrodo de herramienta y durante el mecanizado a mesoescala y microescala, es decir, por ejemplo en la mesoescala (área instantánea de la superficie de electrodo de 10 mm<sup>2</sup> a 1 mm<sup>2</sup>) y en la microescala (área instantánea de la superficie de electrodo entre 1 mm<sup>2</sup> y 0,001 mm<sup>2</sup> o menor y/o dimensiones sobre y/o del electrodo por debajo de 1 mm), el desgaste de electrodo también es considerable con los procedimientos de mecanizado antes mencionados.

35 En algunas realizaciones, se define la superficie instantánea de electrodo como el área de la superficie de proyección de la superficie del electrodo sobre la cual se está produciendo una descarga eléctrica, es decir, una chispa. La dimensión de tamaño del electrodo se refiere, en algunas realizaciones, a estructuras o partes del electrodo que tienen una dimensión definida, tales como nervaduras o similares, donde el grosor de cada nervadura es inferior a, por ejemplo, 1 mm, con independencia de la longitud y el ancho de las nervaduras.

40 Además, como se ha mencionado al principio, a partir de J. Valentinčič, M. Junkar, "On-line selection of rough machining parameters", Journal of Materials Processing Technology 149, 2004, págs. 256-262, se sabe que la tensión de descarga depende del tamaño de la superficie erosiva, y a partir de J. Valentinčič, M. Junkar, "A model for detection of the eroding surface based on discharge parameters", Machine Tools & Manufacture, 44, 2004, 175-181, se sabe que la señal de corriente eléctrica depende del tamaño de la superficie erosiva.

45 Además, a partir de J. Valentinčič *et al.*, "Selection of optimal EDM machining parameters for the given machining surface", 8<sup>th</sup> International Conference on management of Innovative Technologies MIT, 2005, págs. 217-225, es conocida una selección en línea de los parámetros de mecanizado en función de la superficie de mecanizado dada o del tamaño de la superficie erosiva del electrodo de herramienta.

50 Tal como se muestra en la Figura 1a, un tamaño 105 de la superficie erosiva de un electrodo 102 de herramienta se puede definir como una proyección de la superficie 106 de mecanizado, es decir, la superficie entre una pieza 104 de trabajo y el electrodo 102 de herramienta, sobre el plano perpendicular a la dirección 101 de mecanizado del electrodo 102 de herramienta.

55 Por tanto, el "tamaño de la superficie erosiva" de ese documento es diferente del "tamaño de la superficie erosiva instantánea", ya que el tamaño de la superficie erosiva instantánea se refiere sólo a la estructura del electrodo en donde tiene lugar la descarga eléctrica actual (instantánea), es decir, donde se está produciendo en ese momento una chispa.

60 El "tamaño de la superficie erosiva" de Valentinčič *et al.*, considera sólo la superficie teórica total donde se pueden producir chispas. En otras palabras, Valentinčič no reconoce casos en donde por ejemplo, la chispa se produce sobre una estructura específica del electrodo de herramienta, tal como una esquina, borde, nervadura o similar, que es diferente en su tipo de dimensión de otras estructuras, tales como una zona de superficie plana, nervaduras con

dimensiones mayores, o similares.

El electrodo de herramienta utilizado en esa publicación de Valentinčič *et al.* tiene una forma cónica (Figura 1a). Durante el mecanizado con ese electrodo de herramienta cónico el tamaño de la superficie erosiva se agranda. Para la optimización en línea de los parámetros de mecanizado, se vigila el porcentaje de descargas en cortocircuito. En caso de que el porcentaje mínimo de cortocircuitos exceda un valor crítico se selecciona un conjunto de parámetros de mecanizado con una potencia inferior. Si el porcentaje mínimo de cortocircuitos no excede el valor crítico, o bien es óptima la potencia en el hueco o bien es incluso demasiado pequeña para alcanzar la máxima velocidad de arranque de material.

Para detectar que el tamaño de la superficie erosiva ha aumentado, se calculan valores medios de tensión de descarga. Así, Valentinčič *et al.* consideran múltiples valores de tensión de descarga para múltiples descargas eléctricas que tienen lugar en diferentes ubicaciones sobre el electrodo de herramienta. Por lo tanto, Valentinčič *et al.* no son capaces de detectar la descarga eléctrica (chispa) que se produce en una ubicación específica sobre el electrodo de herramienta.

El autor de la presente invención ha encontrado que se pueden reducir considerablemente el desgaste del electrodo de herramienta, especialmente en esquinas y/o bordes, y el desgaste de electrodos compuestos con macro- y/o meso- y/o microestructuras, y se puede mejorar la velocidad de arranque de material, mediante el análisis de la tensión y/o corriente de descarga, que son indicativas de la ubicación de la chispa actual, y mediante la adaptación de parámetros de la tecnología de proceso de manera correspondiente en base al área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado. Así, el autor de la presente invención también ha encontrado que se pueden determinar el área instantánea de la superficie erosiva y la ubicación asociada de la descarga de chispa actual mediante el análisis de su tensión y/o corriente de descarga durante el mecanizado.

Como ya se ha discutido, la tensión de descarga es indicativa del tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva del electrodo de herramienta y/o de la ubicación de la chispa y, por tanto, mediante el análisis de la tensión de descarga aplicada al hueco de mecanizado se pueden extraer conclusiones acerca del tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva del electrodo de herramienta.

El tamaño instantáneo de la superficie erosiva puede definirse o determinarse en algunas realizaciones, como se ha mencionado más arriba, como una proyección de la superficie de mecanizado, es decir la superficie entre la pieza de trabajo y el electrodo, sobre el plano perpendicular a la dirección de mecanizado, en donde se produce una descarga eléctrica en ese momento y, por tanto, se sitúa una chispa.

En algunas realizaciones solamente se considera área instantánea de la superficie erosiva una zona "inmediata" que rodea al electrodo donde está teniendo lugar la descarga. Como se ilustra en la Figura 1b, en estas realizaciones el área instantánea de la superficie erosiva se define de manera que las chispas en las esquinas y/o bordes 107 de un electrodo 116 de herramienta se producen en un área instantánea 108 de la superficie erosiva que es menor que el área instantánea 109 de la superficie erosiva para chispas que se producen en la superficie plana - aunque el área de proyección del electrodo 116 de herramienta sobre el plano perpendicular 109 dado, es decir, el área de la superficie erosiva según Valentinčič discutida más arriba, es mayor, como se muestra en la Figura 1b.

De este modo, en algunas realizaciones, incluso para una diversidad de configuraciones de electrodo de herramienta, el área instantánea de la superficie erosiva para una chispa dada puede considerarse de la manera mencionada más arriba.

La Figura 1c ilustra un electrodo 116 de herramienta compuesto, con diferentes áreas instantáneas 111a y 111b de superficie que tienen diferentes dimensiones y, por tanto, provocan al menos dos chispas diferentes, que difieren en su información asociada (que se mide) de tensión y/o corriente de descarga. La Figura 1d ilustra otro electrodo 115 de herramienta con una estructura de tipo único. Para este electrodo 115 de herramienta sólo se obtienen dos valores de tensión y/o corriente de descarga diferentes, cuando la descarga eléctrica se produce sobre la superficie más grande 113 y cuando se produce sobre la superficie más pequeña 114a. Por otra parte, mediante el análisis de la tensión y/o corriente de descarga asociadas también se pueden determinar descargas eléctricas que se produzcan en una esquina 114b del electrodo 115 de herramienta, como se ha discutido más arriba, aunque el área de proyección para estas diferentes estructuras 113, 114a y 114b será la misma.

Como ya se ha mencionado, la base física subyacente para la anterior reflexión es que el valor de tensión de descarga y/o el valor de corriente de descarga (medidos) de cada descarga eléctrica, es decir, cada chispa, depende del área instantánea de la superficie erosiva sobre la cual se está produciendo. Por lo tanto, existe una asociación entre el área instantánea de la superficie erosiva y la tensión y/o corriente de descarga de la descarga eléctrica que está teniendo lugar en ese momento dentro del área instantánea de la superficie erosiva.

En algunas realizaciones, la tensión de descarga de la descarga eléctrica también puede ser indicativa del estado de plasma de descarga, por ejemplo plasma de fase metálica o plasma de fase gaseosa. Además, se puede presumir que los estados de plasma para distintas áreas instantáneas y también para esquinas y bordes pueden ser

ligeramente diferentes y, por tanto, se originen diferentes valores de tensión de descarga en función del área instantánea o la ubicación de la chispa en las esquinas o bordes de electrodos. Otro aspecto incluye la distancia de hueco entre el electrodo y la pieza de trabajo, que también puede afectar a los valores de tensión de descarga para chispas en diferentes áreas instantáneas o en las esquinas o bordes, en donde, debido a una diferente intensidad de campo eléctrico local, la cambiante longitud de chispa altera la resistividad del canal de plasma asociado y en última instancia, altera la tensión medida de descarga de la chispa.

En algunas realizaciones, la información de tensión de descarga también se puede utilizar indirectamente empleando valores de corriente de descarga que fluctúan y también proporcionan la misma información del área instantánea de la superficie erosiva y/o la ubicación de la chispa en esquinas o bordes, si se emplean pulsos de tipo resistor en lugar de pulsos de tipo transistor. Un pulso de resistor/transistor es un pulso generado por una fuente resistor/transistor. La diferencia radica en el control del generador de corriente, en donde los pulsos de transistor mantienen corriente constante a través del hueco con independencia del valor de tensión de descarga de la chispa. Por otra parte, los pulsos de resistor utilizan un resistor constante o variable que mantiene la corriente deseada a través del hueco pero puede variar con el cambio en la tensión de descarga de la chispa de acuerdo con la ley de Ohm. En algunas realizaciones, una consideración adicional puede basarse en el radio del canal disponible para la corriente dada que se debe suministrar al canal de plasma durante la descarga, a través del electrodo. Por ejemplo, las chispas en las esquinas o bordes (Figura 1b) tienen un volumen disponible mucho menor para el suministro de corriente dentro del electrodo de herramienta en comparación con las chispas en la gran área instantánea de la superficie erosiva. El dieléctrico disponible en los alrededores del canal de plasma de la chispa puede representar otra explicación. Para que se produzca la disrupción de la chispa sobre una pequeña área instantánea de la superficie, como por ejemplo un área de microescala, una esquina o un borde, el plasma puede estar formado en gran medida por vapor metálico en lugar de fase gaseosa de vapor. Por el contrario, las chispas que se producen en una gran área instantánea de superficie pueden comprender mayor vapor gaseoso formado a partir del dieléctrico circundante, en lugar de vapor metálico en su canal de plasma. Diferentes fases de plasma muestran diferentes tensiones de descarga y, así, ayudan a detectar en tiempo real el área instantánea de la superficie de la chispa que se produce.

Algunas realizaciones se refieren a un método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo).

El aparato tiene al menos un electrodo de herramienta y una pieza de trabajo. El método comprende situar el electrodo de herramienta con respecto a la pieza de trabajo. Con ello se define un hueco de mecanizado entre el electrodo de herramienta y la pieza de trabajo. Se aplica una descarga a través del hueco de mecanizado con el fin de iniciar una descarga eléctrica entre el electrodo de herramienta y la pieza de trabajo.

En el siguiente paso del método se genera al menos un impulso de descarga que es aplicado al hueco de mecanizado y que genera una descarga eléctrica a través del hueco de mecanizado. Se analiza la tensión de descarga eléctrica resultante a través del hueco de mecanizado. Se realiza el análisis sobre la descarga eléctrica actual que se genera por la aplicación del al menos un impulso de descarga. Así, mediante el análisis de la tensión y/o corriente de descarga en la descarga eléctrica actual (instantánea), el análisis es indicativo del área instantánea de la superficie erosiva en donde tiene lugar la descarga eléctrica actual, es decir, el área instantánea de la superficie erosiva donde se origina la chispa en ese momento. Basándose en este análisis de la tensión de descarga a través del hueco de mecanizado, generada por el impulso o impulsos de descarga aplicados, se determina el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva del electrodo de herramienta sobre la cual se genera la descarga. Como se ha discutido, la tensión de descarga es indicativa de la dimensión del área instantánea de la superficie erosiva, que está asociada con el lugar del electrodo de herramienta sobre el cual se produce la descarga eléctrica, y que también está definida por la estructura del electrodo de herramienta. Así, en este paso se determina, por ejemplo, si el área instantánea de la superficie erosiva tiene una dimensión que está dentro de la macro- o meso o microescala, o bien si el área instantánea de la superficie erosiva se encuentra en una esquina o borde del electrodo de herramienta. En algunas realizaciones, el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva se define por intervalos de dimensión dados, por ejemplo se determina el tipo de dimensión meso cuando el tamaño de la superficie erosiva se sitúa en el intervalo entre  $10 \text{ mm}^2$  y  $1 \text{ mm}^2$ , etc., como se ha discutido más arriba.

Como se ha discutido más arriba, el autor de la presente invención ha encontrado que se puede reducir considerablemente el desgaste de electrodo y aumentar la velocidad de arranque de material cuando se aplica una tecnología de proceso correspondiente a un tipo correspondiente de dimensión de un área instantánea de la superficie erosiva del electrodo de herramienta. Una tecnología de proceso, como se ha mencionado, se define por un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso (véase más arriba). Por otra parte, el autor de la presente invención ha encontrado que el tiempo de mecanizado para tipos específicos de dimensiones de superficies erosivas, tales como dimensiones en la mesoescala y la microescala, puede mejorarse mediante la aplicación de patrones de impulsos de descarga correspondientemente optimizados para el tipo de dimensión correspondiente. Además, en algunas realizaciones también se adaptan, basándose en la dimensión del área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado, parámetros de mecanizado de los parámetros de la tecnología de proceso, tales como la ejecución de movimientos de salto, la corriente de descarga, la duración de la descarga, la polaridad del electrodo, etc., es decir, los parámetros eléctricos y temporales de la tecnología de proceso del MDE.



En algunas realizaciones, el electrodo de herramienta comprende al menos dos áreas instantáneas de la superficie erosiva que tienen dimensiones diferentes. Por ejemplo, el electrodo de herramienta es un electrodo compuesto que tiene diferentes estructuras con diferentes tipos de dimensiones, por ejemplo una estructura de mesoescala y una estructura de microescala, que corresponden, según la definición anterior de superficie erosiva, a diferentes tamaños de superficie instantánea de erosión, es decir para una chispa en cualquiera de las estructuras del electrodo de herramienta, se puede derivar con la definición anterior un tamaño específico de superficie instantánea de erosión. Por ejemplo, basándose en la información de tensión de descarga se asocia la estructura de mesoescala con un tamaño de mesoescala de la superficie instantánea de erosión, y se asocia la estructura de microescala con un tamaño de microescala de la superficie instantánea de erosión ya que, en un momento dado, sólo en una de las dos superficies distintas se puede producir una descarga de impulso dada. Por ejemplo, una primera descarga eléctrica (chispa) se sitúa sobre la estructura de mesoescala del electrodo de herramienta y, por tanto, la tensión y/o corriente de descarga medidas corresponden a un área instantánea de la superficie erosiva de mesoescala. Una segunda descarga eléctrica se sitúa, por ejemplo, sobre el área instantánea de la superficie erosiva de microescala y, por tanto, la tensión y/o corriente de descarga medidas corresponden a un área instantánea de la superficie erosiva de microescala.

Si se aplica a un electrodo de herramienta compuesto semejante, por ejemplo, tecnología de proceso con un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso optimizados para estructuras de mesoescala, las estructuras de microescala del electrodo compuesto estarán sujetas a intenso desgaste. Por otro lado, si se aplica al electrodo de herramienta compuesto un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso que esté optimizado para estructuras de microescala, por ejemplo el tiempo de mecanizado será mayor que con un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso optimizado para la mesoescala. Lo mismo se aplica en el caso de que, por ejemplo, se utilice un electrodo de herramienta con estructuras de mesoescala para un ciclo de mecanizado de primer tipo y, por ejemplo, se utilice otro electrodo de herramienta con estructura de microescala para un ciclo de mecanizado de segundo tipo, que sea posterior o anterior al ciclo de mecanizado de primer tipo. Si se aplica únicamente un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso para ambos electrodos de herramienta, la microestructura se verá sometida a un intenso desgaste en el caso de un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso que esté optimizado para la mesoestructura, o bien el tiempo global de mecanizado para la herramienta de mesoestructura será más largo en el caso de un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso que esté optimizado para la microestructura.

Como ya se ha mencionado, el conjunto de parámetros de la tecnología de proceso comprende, en algunas realizaciones, al menos un patrón de impulsos específico y/u otros parámetros eléctricos y temporales de parámetros de la tecnología de proceso optimizados (para una dimensión), como se ha mencionado más arriba. En general, los conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso pueden ser diferentes para dos tecnologías de proceso optimizadas y adaptadas para dos áreas instantáneas de la superficie erosiva diferentes.

Así, en algunas realizaciones, para cada tipo de dimensión de superficie instantánea de erosión detectado, como por ejemplo el tipo de dimensión macro o meso o micro, se aplica una tecnología de proceso respectiva para la descarga y un conjunto respectivo de parámetros de la tecnología de proceso, respectivamente, que están optimizados para el tipo respectivo de dimensión de superficie instantánea de erosión que se ha detectado.

Tal conjunto predefinido, y respectivamente optimizado, de parámetros de la tecnología de proceso para la descarga, como por ejemplo un patrón de impulsos, se establece basándose en el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva del electrodo de herramienta que se ha determinado. Se generan una o varias descargas respectivas, según el conjunto de parámetros de la tecnología de proceso que se ha establecido, como por ejemplo un patrón de impulsos de descarga, y se aplican a través del hueco de mecanizado. Por lo tanto, en algunas realizaciones en las que, por ejemplo, se utilizan electrodos compuestos con estructuras diferentes conforma a tipos distintos de dimensión, se aplican los correspondientes patrones de impulsos de descarga o conjunto optimizado de parámetros de la tecnología de proceso a la superficie del tipo asociado de dimensión del electrodo. Por ejemplo, cuando se determina que la tensión de descarga de una chispa dada es indicativa del tipo de dimensión de mesoescala, se aplica un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso (por ejemplo, patrones de impulsos de descarga) optimizado para una estructura de mesoescala del electrodo compuesto. Análogamente, en caso de que la tensión de descarga de la chispa sea indicativa de una estructura instantánea de microescala del electrodo compuesto, se aplica un conjunto optimizado para microescala de parámetros de la tecnología de proceso. Por lo tanto, en algunas realizaciones, para cada tipo de dimensión de una estructura se aplica a través del hueco de mecanizado un conjunto asociado de parámetros de la tecnología de proceso, reduciendo así el desgaste, en particular de mesoestructuras, microestructuras, esquinas y bordes, del electrodo de herramienta y aumentando al mismo tiempo la velocidad global de mecanizado.

Aunque la descripción se refiere principalmente a electrodos de herramienta compuestos que tienen al menos dos tipos diferentes de dimensión de la superficie erosiva, la presente invención también es aplicable a electrodos de herramienta que tienen sólo un único tipo de dimensión de la superficie erosiva. Por ejemplo, en algunas realizaciones se usa un electrodo de herramienta con una estructura de mesoescala y, por ejemplo, para otro proceso de mecanizado se cambia este electrodo de herramienta con estructura de meso-escala por otro electrodo

de herramienta que tiene solamente una estructura de microescala, o bien se cambia por un electrodo compuesto con estructuras de tipo de dimensión diferente. Por otra parte, en algunas realizaciones se utiliza un electrodo de herramienta que tiene una forma que altera continuamente la superficie erosiva, por ejemplo una forma cónica. También en tales realizaciones se determina el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva, tal como se ha explicado más arriba. De la misma manera, también se pueden detectar chispas producidas en las esquinas o bordes de una superficie instantánea de mesoescala o macroescala del electrodo basándose en su información de tensión y/o corriente de descarga, y se puede adaptar un conjunto respectivo de parámetros de la tecnología de proceso para ajustar una densidad de corriente deseada en las chispas de esquina o de borde, manteniendo al mismo tiempo en un valor requerido la densidad de corriente requerida para chispas que se producen en superficies mayores, las cuales se detectan a su vez basándose en la información de tensión y/o corriente de descarga de la chispa.

En algunas realizaciones, el conjunto correspondiente de parámetros de la tecnología de proceso, que define, por ejemplo, un patrón de impulsos de descarga, está predefinido y, por ejemplo, almacenado en una memoria del aparato para mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo). En algunas realizaciones pueden estar optimizados diferentes conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso que representen diferentes tecnologías de proceso para el mecanizado de diferentes tipos de dimensión de áreas instantáneas de la superficie erosiva, y pueden estar prealmacenados. Tales conjuntos de parámetros de la tecnología de procesos se pueden confeccionar, por ejemplo, optimizando el desgaste del electrodos de herramienta y el tiempo de mecanizado en una configuración experimental mediante la variación de parámetros eléctricos y/o temporales típicos de las descargas. Son parámetros típicos que se optimizan para el conjunto de parámetros de la tecnología de proceso, que por ejemplo representan patrones predefinidos de impulsos de descarga, entre otros, la corriente y/o tensión de descarga aplicadas, la duración del impulso de descarga y las pausas entre impulsos de descarga individuales y/o grupos de impulsos de descarga (que también se denominan trenes de impulsos de descarga), la polaridad de los pulsos, el tipo de pulso (corriente inicial, corriente final, trayecto de incremento de corriente), y picos de corriente de duración definida durante la descarga.

En algunas realizaciones, el tipo de dimensión se define por un intervalo específico, por ejemplo predefinido, de dimensión, por ejemplo de  $10 \text{ mm}^2$  a  $1 \text{ mm}^2$  para el tipo de dimensión de mesoescala, por ejemplo de  $1 \text{ mm}^2$  a  $0,1 \text{ mm}^2$  o inferior para el tipo de dimensión de microescala, y por encima de  $10 \text{ mm}^2$  para el tipo de dimensión de macroescala. En algunas realizaciones, el tipo de dimensión y el intervalo de valores asociado están definidos por el usuario así como el conjunto o conjuntos asociados de parámetros de la tecnología de proceso que están optimizados para tal tipo de dimensión.

En algunas realizaciones, se establece un primer conjunto de parámetros de la tecnología de proceso cuando el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado es de un primer tipo, y se establece un segundo conjunto de parámetros de la tecnología de proceso cuando el tipo de dimensión del área de la superficie erosiva que se ha determinado es de un segundo tipo. El primer y segundo conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso son diferentes entre sí, y el primer y segundo tipos de dimensión de las áreas instantáneas de la superficie erosiva también son diferentes entre sí. Por lo tanto, en tales realizaciones es posible que para cada clase de área instantánea de la superficie erosiva detectada se establezca un conjunto específico de parámetros de la tecnología de proceso que esté optimizado para ese respectivo tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva.

Como ya se ha mencionado, en algunas realizaciones el electrodo de herramienta, por ejemplo un electrodo de herramienta compuesto, comprende al menos dos áreas instantáneas de la superficies erosiva que tienen tipos de dimensión diferentes y/o el electrodo de herramienta comprende al menos dos áreas instantáneas de la superficie erosiva que originan una descarga eléctrica con al menos dos valores distintos de tensión y/o corriente de descarga. En algunas realizaciones, esto también es cierto para electrodos de herramienta que tengan una única superficie de proyección, pero las descargas eléctricas, es decir, las chispas, también puedan producirse también en diferentes áreas instantáneas de la superficie erosiva, por ejemplo en una superficie plana, una esquina o un borde del electrodo de herramienta.

Así, en algunas realizaciones, el área instantánea de la superficie erosiva es al menos una de: una esquina, un borde, una cara lateral o una cara frontal del electrodo.

En algunas realizaciones también se determina, en base al análisis de la tensión de descarga y/o la corriente de descarga, el número de áreas instantáneas de la superficie erosiva que tienen diferentes tipos de dimensión. Esto se realiza, por ejemplo, analizando el historial de áreas instantáneas de la superficie erosiva detectadas.

Como ya se ha mencionado, en algunas realizaciones el primer y/o segundo conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso definen un patrón de impulsos de descarga. Un patrón de impulsos de descarga comprende al menos un impulso de descarga de primer tipo y al menos un impulso de descarga de segundo tipo. El impulso de descarga de primer tipo tiene una duración de impulso mayor que la duración de impulso del impulso individual de descarga de segundo tipo. El impulso de descarga de primer tipo origina la formación de una película protectora contra el desgaste sobre el electrodo de herramienta y el impulso de descarga de segundo tipo provoca erosión al

menos sobre el electrodo de herramienta. En algunas realizaciones, el patrón de impulsos incluye grupos de impulsos de descarga que son consecutivos en el tiempo y están interrumpidos por pausas de impulso. Un grupo de impulsos de descarga comprende un número predefinido de impulsos de descarga y forma, en algunas realizaciones, un denominado tren de impulsos. En algunas realizaciones, un patrón de descarga para un tipo de dimensión de mesoescala o de macroescala comprende un grupo con impulsos de descarga que tienen los mismos parámetros, como la corriente de impulso de descarga, la duración de impulso de descarga y la duración de la pausa de impulso entre los impulsos de descarga individuales del grupo. En algunas realizaciones, existe una pausa de impulso entre dos grupos consecutivos de impulsos de descarga a los que se denomina tren de impulsos. Esta pausa del tren de impulsos entre los grupos tiene una duración que es generalmente mayor que la duración de las pausas de impulso utilizadas entre los impulsos de descarga dentro del tren de impulsos. En el caso de las mesoestructuras, tal patrón de impulsos de descarga proporciona una elevada velocidad de erosión durante la aplicación del tren de impulsos y una recuperación del hueco de mecanizado entre las pausas de impulso entre los trenes de impulsos, mientras que el desgaste del electrodo de herramienta es bajo.

En algunas realizaciones, se establece un primer patrón predefinido de impulsos de descarga cuando el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado es de un primer tipo, por ejemplo el tipo de dimensión de mesoescala, y se establece un segundo patrón predefinido de impulsos de descarga cuando el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado es de un segundo tipo, por ejemplo el tipo de dimensión de microescala. La primera y la segunda tecnologías de proceso o patrones predefinidos de impulsos de descarga son diferentes entre sí, y el primer y segundo tipos de dimensión de las áreas instantáneas de la superficie erosiva son diferentes entre sí. En este caso, por ejemplo, el primer patrón predefinido de impulsos de descarga está optimizado para el mecanizado con una estructura de mesoescala del electrodo de herramienta y el segundo patrón predefinido de impulsos de descarga está optimizado para el mecanizado con una estructura de microescala del electrodo de herramienta.

En algunas realizaciones, un primer tipo de dimensión es indicativo de una estructura del electrodo de herramienta que es menor o igual que  $1 \text{ mm}^2$  (microescala) y un segundo tipo de dimensión es indicativo de una estructura del electrodo que es mayor que  $1 \text{ mm}^2$  (mesoescala o macroescala). En algunas realizaciones, al menos un conjunto de parámetros predefinidos de tecnología de proceso que definen, por ejemplo, un patrón de impulsos de descarga, está optimizado para un área instantánea de la superficie erosiva del electrodo de herramienta que es menor o igual que  $1 \text{ mm}^2$  (mesoescala) y al menos un segundo conjunto de parámetros predefinidos de tecnología de proceso que definen, por ejemplo, un segundo tipo de patrón de impulsos de descarga, está optimizado para un área instantánea de la superficie erosiva del electrodo de herramienta que es mayor que  $1 \text{ mm}^2$  (mesoescala o macroescala).

En algunas realizaciones se utilizan durante un único ciclo de mecanizado al menos dos tecnologías de proceso diferentes representadas por dos conjuntos diferentes de parámetros de tecnología de proceso. Se aplican en base a al menos dos valores detectados distintos de tensión o corriente de descarga medidos, por ejemplo, después de la disrupción de la chispa de la descarga eléctrica actual, lo que indica el área instantánea de la superficie erosiva en donde, bajo las condiciones de proceso existentes, como materiales de electrodo y de pieza de trabajo, dieléctrico, corriente máxima por chispa, duración de pulso, etc., se ubica la chispa en ese momento,

En algunas realizaciones, un primer valor de tensión y/o corriente de descarga es indicativo de una chispa que se produce en la esquina o borde del electrodo de herramienta. El electrodo de herramienta puede tener, por ejemplo, dimensiones de mesoescala o de macroescala. Sin embargo, si se pueden caracterizar al menos dos chispas diferentes basándose en su información de tensión de descarga para un determinado ciclo de mecanizado, se puede adaptar una correspondiente tecnología de proceso y, por tanto, un correspondiente conjunto de parámetros de la tecnología de proceso para el área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado. Así, en este tipo de adaptación de proceso en tales realizaciones se pueden observar al menos dos tipos diferentes de tecnología de proceso durante un solo ciclo de mecanizado. Por ejemplo, uno de los conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso (que incluyen la duración de pulso de chispa instantánea, corriente de chispa, duración de pausa al término de la chispa, parámetros para la chispa o chispas posteriores, en algunos casos tren predefinido de impulsos, etc.) está optimizado para una chispa que se produce en una esquina o borde del electrodo de herramienta, mientras que otro conjunto de parámetros de la tecnología de proceso está optimizado para un área instantánea mayor de la superficie erosiva. Esto se traduce en una mayor velocidad global de arranque de material, al tiempo que se produce un desgaste de herramienta bajo o casi nulo tanto en la cara frontal como en las esquinas y bordes del electrodo de herramienta. Esto a su vez reduce también las necesidades de recursos para operaciones de mecanizado posteriores tales como semiacabado y acabado, si fueran necesarias. Por lo tanto, esta adaptación del proceso se traduce en una mayor productividad, precisión y exactitud de forma mejoradas, logro de un radio interior más pequeño con menor número de electrodos, etc.

Durante un ciclo de erosión, por ejemplo un ciclo de desbaste, en algunas realizaciones se erosionan estructuras con diferentes áreas de superficie, especialmente de macroescala, mesoescala, microescala, con diversas configuraciones posibles. Durante el mecanizado con tales electrodos de herramienta, se analiza para cada chispa la tensión y/o corriente de descarga, y se obtiene la información resultante acerca de la tensión y/o corriente de descarga. A continuación, se adapta la tecnología de proceso durante la misma chispa o al término de la chispa estableciendo un conjunto adecuado de parámetros de la tecnología de proceso.

En algunas realizaciones, la rugosidad superficial a producir en la pieza de trabajo está determinada por el tipo de dimensión que se ha determinado para el área de la superficie erosiva. Así, en algunas realizaciones es posible procurar automáticamente una rugosidad diferente sobre áreas distintas de la superficie de la pieza de trabajo con el mismo electrodo de herramienta. Por ejemplo, en el caso de un electrodo de herramienta compuesto que tenga estructuras de mesoescala y de microescala, se puede procurar durante un mismo ciclo de mecanizado una rugosidad diferente para las estructuras de mesoescala y de microescala a producir en la pieza de trabajo. Esta realización se puede aplicar en la industria electrónica, por ejemplo, para crear diferentes rugosidades dentro del mismo proceso de mecanizado. Por ejemplo, en algunas realizaciones se puede formar dentro del mismo proceso de mecanizado un punto de posicionamiento, por ejemplo un punto semiesférico, que tenga una superficie más fina en comparación con una parte rectangular de mayor tamaño. En algunas realizaciones, este concepto se basa en detectar si la chispa de descarga se encuentra en un tipo específico de área instantánea de la superficie erosiva, tal como área de macroescala, mesoescala o microescala del electrodo de herramienta, como se ha discutido más arriba. Basándose en esta determinación, se establece un conjunto correspondiente de parámetros de la tecnología de proceso que representa, por ejemplo, un correspondiente patrón de impulsos de descarga, de manera que se produce una rugosidad superior o inferior. De esta manera se puede producir, durante el proceso de erosión, una rugosidad superficial distinta con un único electrodo de herramienta.

El autor de la presente invención también ha encontrado que, en particular en las escalas de mesomecanizado y micromecanizado antes definidas, y en las esquinas y bordes, se puede reducir considerablemente el desgaste del electrodo de herramienta mediante la introducción de un patrón de impulsos de descarga que incluya al menos un tren de impulsos específico para el mesomecanizado y/o el micromecanizado, en donde para cada tren de impulsos el desgaste es casi nulo. Esto se logra mediante la introducción, en cada tren de impulsos individual, de al menos un primer tipo de impulso de descarga que está configurado para formar o acumular una capa protectora sobre el electrodo de herramienta y, de manera consecutiva, al menos un segundo tipo de impulso de descarga que provoca erosión en la capa protectora sobre el electrodo de herramienta y en la pieza de trabajo, como también se ha discutido más arriba.

El primer tipo de impulso de descarga tiene una duración de impulso mayor que el segundo tipo de impulso de descarga. En algunas realizaciones, la corriente y/o tensión de descarga son idénticas para los diferentes tipos de impulso de descarga. La definición de estos dos grupos de descarga, es decir, primer tipo y segundo tipo, se basa en la duración de pulso, traduciéndose el primer grupo de pulsos, que tiene una duración de pulso mayor, en la formación de una capa protectora sobre el electrodo de herramienta, y teniendo el segundo grupo de pulsos una duración de pulso que provoca desgaste en el electrodo de herramienta. Mediante la combinación de al menos un impulso de descarga de primer tipo y al menos un impulso de descarga de segundo tipo, se puede generar un tren de impulsos que presenta un desgaste casi nulo de la herramienta.

Los parámetros específicos de los impulsos de primer tipo y de segundo tipo del tren de impulsos, tales como la duración del impulso, el tiempo en apagado entre los impulsos individuales y el número de impulsos de descarga de segundo tipo, dependen de, por ejemplo, la estructura y/o las dimensiones de la superficie del electrodo de herramienta, del material del electrodo y de la pieza de trabajo, del líquido de mecanizado, del tipo de pulso, etc.

El tren de impulsos se genera, por ejemplo, mediante el generador del aparato de MDE. El tren de impulsos incluye al menos un impulso de descarga de primer tipo y al menos un impulso de descarga de segundo tipo. En algunas realizaciones, los impulsos de descarga de segundo tipo están dispuestos en cualquier orden con respecto al impulso de descarga de primer tipo, por ejemplo, un impulso individual de descarga de primer tipo viene primero en el tren de impulsos y el o los impulsos de descarga de segundo tipo vienen después del impulso de descarga de primer tipo. La chispa de descarga cuyo valor de tensión se mide y se utiliza para la adaptación de parámetros de la tecnología de proceso discutida con anterioridad, puede ser alterada (a través de parámetros eléctricos y/o temporales) y hecha parte de un tren de impulsos adaptado para el área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado.

El impulso de descarga de primer tipo provoca principalmente la generación o formación de una película protectora o capa protectora contra el desgaste, sobre el electrodo de herramienta. La película protectora se puede formar, como se ha discutido más arriba en relación con el documento US 3,558,842 A, por partículas de reacción del fluido de mecanizado y/o del electrodo de herramienta y/o de la pieza de trabajo. En algunas realizaciones, el electrodo de herramienta comprende grafito o cobre u otros. En tales realizaciones, el impulso de descarga de primer tipo puede formar o generar una capa de grafito pirolítico sobre el electrodo de herramienta, que puede tener un mayor grado de dureza en comparación con el material de grafito "normal". En algunas realizaciones, se forma la capa protectora, en particular, en una región frontal del electrodo de herramienta, en donde tienen lugar la mayoría de las descargas.

El impulso de descarga de segundo tipo provoca erosión al menos sobre el electrodo de herramienta y, adicionalmente, sobre la pieza de trabajo. Al estar el electrodo de herramienta protegido por la película protectora producida por el impulso individual de descarga de primer tipo del tren de impulsos, mayormente no se desgasta el electrodo de herramienta en sí, sino sólo la capa protectora que se ha formado sobre el mismo.

En algunas realizaciones, dentro de un tren de impulsos la película protectora contra el desgaste sobre el electrodo de herramienta que se ha generado por el impulso de descarga de primer tipo es erosionada casi por completo por los impulsos de descarga de segundo tipo del tren de impulsos.

5 El tren de impulsos con los impulsos de descarga de primer y segundo tipo se aplica al electrodo de herramienta de manera que tiene lugar una descarga correspondiente a través del hueco de mecanizado entre el electrodo de herramienta y la pieza de trabajo. Así, en realizaciones en donde la capa protectora producida dentro de un tren de impulsos es erosionada dentro de un tren de impulsos, el electrodo de herramienta tiene (casi) la forma original después de la aplicación de cada tren de impulsos.

10 Debido a esta exactitud de contorno característica en algunas realizaciones, también se pueden mecanizar con elevada exactitud y precisión de forma estructuras en la mesoescala, microescala o incluso macroescala. En algunas realizaciones, la conformidad de forma reduce el trabajo en el mecanizado posterior y aumenta la productividad, al tiempo que reduce las necesidades de recursos tales como número de electrodos, mecanizado de electrodos, material del electrodo, tiempo de preparación del electrodo.

15 En algunas realizaciones se mantiene constante la relación entre impulsos de descarga de primer y de segundo tipo con el fin de provocar un desgaste predefinido sobre el electrodo de herramienta. Así, no se establece el patrón de impulsos de descarga que comprende el tren de impulsos con el impulso de descarga de primer tipo y al menos un impulso de descarga de segundo tipo, sino que se mantiene la relación entre los al menos dos tipos de descarga diferentes (basados principalmente en la duración de pulso) en un valor específico dentro de una tolerancia dada para cada nivel de tensión de descarga que se detecte. Con ello se puede lograr una cantidad de desgaste predefinida o establecida de manera dinámica, ya que los impulsos de descarga de primer tipo generan una cantidad dada de película protectora sobre el electrodo de herramienta, mientras que los impulsos de descarga de segundo tipo provocan un desgaste dado en el electrodo de herramienta y en la película protectora sobre el electrodo de herramienta, respectivamente. Los al menos dos tipos de descarga (clasificados fundamentalmente en base a la duración de pulso) son generados cada uno para un nivel de tensión de descarga detectado, que a su vez es indicativo de un área instantánea de la superficie erosiva en donde se ubica la chispa actual, y se mantiene un valor especificado de la relación entre estos al menos dos tipos diferentes de descarga (basados en la duración de pulso). Además, si el mecanizado indica un tipo de descarga distinto, en base a la información de tensión de descarga de chispa, se generan otros dos tipos de descarga (basados principalmente en la duración de pulso) con una relación entre estos diferentes tipos de descarga mantenida en un valor especificado dentro de la tolerancia. La información de nivel de tensión de descarga que se determine puede ser indicativa del tipo de dimensión de la superficie instantánea de erosión, y diferenciar así áreas instantáneas de chispa pertenecientes al tipo macro, o meso, o micro, o sobre la esquina o borde.

20 En algunas realizaciones, durante un solo ciclo de mecanizado se aplican al menos dos tecnologías de proceso diferentes representadas por al menos dos conjuntos diferentes de parámetros de tecnología de procesos, en donde uno está optimizado para características de macroescala o mesoescala y el otro está optimizado para características de microescala. Este conjunto de parámetros de la tecnología de proceso define trenes de impulsos o bien mantiene una relación constante entre los al menos dos tipos diferentes de descarga (basados en la duración de pulso) en cada nivel de tensión de descarga distinto que se detecte, que es indicativo de una respectiva área instantánea de la superficie erosiva. Al mismo tiempo, también se pueden alterar o controlar otros parámetros eléctricos y/o temporales de respectivos conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso.

25 En algunas realizaciones, los métodos sugeridos más arriba se aplican a descargas de polaridad positiva, descargas de polaridad negativa o combinación de ambas. En algunas realizaciones, los niveles de tensión de descarga para una chispa en función del área instantánea de la superficie erosiva también son diferentes para la polaridad negativa del electrodo de herramienta y para la polaridad positiva del electrodo de herramienta. Los valores de tensión de descarga indicativos de un área instantánea de la superficie erosiva de la chispa actual dependen del material de electrodo, material de pieza de trabajo, tipo de dieléctrico, tipo de pulso (corriente inicial, corriente final, trayecto seguido para el incremento de corriente), polaridad del electrodo de herramienta, estado de plasma de descarga para un área instantánea dada de la superficie. Se pueden prealmacenar estos valores en una base de datos y compararlos durante o después de la medición de la información de tensión de descarga para cada interrupción de chispa detectada durante un ciclo individual de mecanizado.

30 En las realizaciones, se aplica durante el mecanizado un pulso piloto que tiene al menos una función de detectar el área instantánea de la superficie erosiva en la que se está produciendo la chispa durante la descarga eléctrica actual. Mediante el análisis de la tensión y/o corriente de descarga de dicha descarga de impulso piloto, en el transcurso de escasos microsegundos (por ejemplo 0,1-50  $\mu$ s), es posible aplicar un conjunto de parámetros de tecnología optimizado para el área instantánea de la superficie erosiva indicada por la información de tensión de descarga del impulso piloto aplicado que se ha analizado. El impulso piloto puede tener las mismas o diferentes propiedades (por ejemplo polaridad, duración de pulso, corriente por pulso, forma de pulso) en comparación con los impulsos que están de acuerdo con el conjunto aplicado de parámetros de la tecnología de proceso que vienen después del impulso piloto.

En algunas realizaciones, se reduce el ruido de conmutación para impulsos que están siendo generados por una fuente lineal de corriente y/o un generador de tipo resistor, con el fin de disminuir la dispersión de valores de la tensión de descarga.

5 En algunas realizaciones, se reduce el tiempo de descarga eléctrica en caso de que se determine un valor de tensión de descarga por encima de un valor predefinido. Con ello, en algunas realizaciones se pueden evitar daños en la pieza de trabajo. En algunas realizaciones, el valor de tensión predefinido se sitúa en aproximadamente 36-40 V.

10 Como ya se ha discutido más arriba, mediante la determinación del área instantánea de la superficie erosiva, se puede determinar la ubicación de la descarga eléctrica y de la chispa asociada. Así, es posible determinar si la chispa se produce, por ejemplo, en una esquina, cara lateral de borde u otra parte estructural característica del electrodo de herramienta, y establecer un conjunto apropiado de parámetros de la tecnología de proceso con el fin de reducir el desgaste del electrodo de herramienta.

15 En algunas realizaciones, los impulsos de descarga que se están generando según el conjunto establecido de parámetros de la tecnología de proceso se aplican durante la descarga eléctrica actual y/o durante una descarga eléctrica consecutiva que se produce en la misma área instantánea de la superficie erosiva detectada y/o al término de la chispa actual. En algunas realizaciones, se asume que la siguiente descarga eléctrica asociada con la chispa se produce en la misma área instantánea de la superficie erosiva y, por tanto, también se puede utilizar para la siguiente descarga eléctrica el conjunto de parámetros de la tecnología de proceso establecido para el área instantánea actual de la superficie erosiva.

20 Algunas realizaciones se refieren a un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo), en particular un aparato de MDE con penetración de matriz o un aparato de MDE de taladrado o un aparato de MDE de fresado, que está adaptado para realizar por lo menos algunos pasos del método de control como se ha descrito más arriba.

25 Un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) semejante comprende partes que son típicamente conocidas por la persona experta, tales como un electrodo de herramienta, una mesa de trabajo para recibir una pieza de trabajo, un generador de impulsos para generar impulsos de descarga y un control para controlar el aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo). El control está adaptado para realizar el método como se ha descrito más arriba.

30 Como ya se discutido más arriba, se analiza la tensión y/o corriente de descarga para una descarga de corriente eléctrica (chispa). Esto requiere, en algunas realizaciones, un hardware de análisis rápido, que esté configurado para realizar dicho análisis en tiempo real. Así, en algunas realizaciones la medición del impulso y la generación del impulso las lleva a cabo un circuito lógico dedicado, ya que esto ha de ser realizado en tiempo real a nivel de chispa individual, por lo que ha de ser realizado a nivel de microsegundos. La lógica usada en tales realizaciones implementa, por ejemplo, ventanas de medición de tensión de descarga (como la ventana de medición  $T_{mes}$  (83), véase la descripción para la Figura 5b más adelante), un tiempo en apagado dispuesto exactamente después de una disrupción de la chispa (véase  $T_{out}$  (82), Figura 5b y descripción asociada), y genera la adaptación de parámetros de la tecnología de proceso como se describe en relación con las Figuras 7a-7c más adelante. En algunas realizaciones, la lógica respectiva está estrechamente relacionada e incrustada en un oscilador y circuito de medición del aparato de MDE. En algunas realizaciones no se puede programar con software esta lógica, ya que el tiempo de reacción en el nivel de milisegundos sería demasiado largo para los microprocesadores programables típicos. En algunas realizaciones, el circuito se ejecuta en un matriz de puertas programable en campo (FPGA, por sus siglas en inglés) programada con VHDL o con una lógica de descripción de hardware similar.

35 Volviendo a la Figura 2, se ilustra un aparato 1 de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) (MDE) con penetración de matriz según la presente invención. La estructura general de un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) con penetración de matriz también es conocida por la persona experta.

40 El MDE 1 de penetración de matriz tiene un bloque 2 de control para ejecutar el proceso de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) descrito en lo que antecede. El bloque 2 de control tiene un módulo general 7 de control, un módulo 8 de control de generador para controlar un generador 4 de impulsos, un módulo 9 de control de hueco de mecanizado para controlar un hueco 13 de mecanizado entre un electrodo 11 de herramienta y una pieza 12 de trabajo, y un módulo 10 de adquisición de hueco para recibir datos relacionados con el hueco de mecanizado durante el proceso de mecanizado.

45 El electrodo 11 de herramienta y la pieza 12 de trabajo se encuentran en un bloque 3 de mecanizado. La colocación del electrodo 11 de herramienta con respecto a la pieza 12 de trabajo se realiza a través de un módulo interpolador 6 y un módulo 5 de accionamiento que acciona los miembros de colocación, tales como servoalimentadores en la dirección c, x, y y z, como se indica en el bloque 3 de mecanizado de la Figura 1. El electrodo 11 de herramienta está hecho de grafito. En otras realizaciones, el electrodo de herramienta puede estar hecho de otros materiales eléctricamente conductores. En esta realización, la pieza 12 de trabajo está hecha de metal. En otras realizaciones, la pieza 12 de trabajo puede estar hecha de otro material eléctricamente conductor, tal como acero o materiales

cerámicos.

La Figura 1c, como también se ha discutido en lo que antecede, ilustra un electrodo 110 de herramienta compuesto, que se utiliza en una realización en el aparato de MDE de la Figura 2. El electrodo 110 de herramienta compuesto tiene una superficie 112 de electrodo con dos estructuras 111a, 111b de superficie diferentes, una estructura más pequeña 111a y una estructura mayor 111b, que son de diferente tipo de dimensión, como se ha discutido en lo que antecede. La estructura más pequeña 111a tiene un tamaño de superficie que está dentro de la microescala y, a modo ilustrativo, es aproximadamente  $0,5 \text{ mm}^2$ . La estructura mayor 111b tiene un mayor tamaño de superficie que, a modo ilustrativo, es aproximadamente  $3 \text{ mm}^2$  y pertenece al tipo de mesoescala. Dado que la estructura más pequeña 111a y la estructura mayor 111b tienen una forma cilíndrica, los tamaños de la superficie son idénticos a los tamaños de la superficie erosiva respectiva definidos más arriba. Por lo tanto, la estructura más pequeña 111a está asociada con un área instantánea de la superficie erosiva que es del tipo de dimensión de microescala (área de superficie inferior a  $1 \text{ mm}^2$  o que tiene una dimensión por debajo de  $1 \text{ mm}$ ), y la estructura mayor 111b está asociada con un área instantánea de la superficie erosiva que es del tipo de dimensión de mesoescala (área de superficie entre  $10 \text{ mm}^2$  y  $1 \text{ mm}^2$ ).

En lo que sigue se explica el método para el proceso de mecanizado con el electrodo 110 de herramienta compuesto, haciendo referencia a la Figura 4, que ilustra un diagrama de flujo de un método de control para controlar el aparato 1 de MDE.

Como se ha discutido más arriba, al principio el electrodo 110 de herramienta está situado con respecto a la pieza 12 de trabajo de manera que existe un hueco 13 de mecanizado predefinido entre el electrodo 110 de herramienta y la pieza 12 de trabajo, paso 201. A continuación, el generador del aparato 1 de MDE genera al menos un impulso de descarga, que es un impulso piloto discutido más arriba, paso 202. El impulso de descarga se aplica a través del espacio 13 de mecanizado, generando con ello una descarga eléctrica (es decir, chispa) a través del espacio de mecanizado, paso 203. La chispa se produce, o bien entre la estructura pequeña 111a y la pieza 12 de trabajo, o bien entre la estructura grande 111b y la pieza de trabajo.

Como se ha discutido más arriba, dado que la tensión de descarga es indicativa del tamaño o tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva, mediante el análisis de la tensión (y/o corriente) de descarga a través del hueco 13 de mecanizado, que se genera por el impulso o impulsos de descarga aplicados, es posible detectar si la chispa se produce en la estructura pequeña 111a del electrodo de herramienta o en la estructura grande 111b del electrodo 110 de herramienta, paso 204. Se puede realizar el análisis de manera que se midan tensiones de descarga individuales en puntos individuales o bien que se mida la tensión de descarga con arreglo a una ventana de medición para la tensión de descarga.

Basándose en este análisis de la información de tensión (y/o corriente) de descarga para una descarga dada, se determina el tipo de dimensión de un área instantánea de la superficie erosiva del electrodo 110 de herramienta, paso 205. Por ejemplo, en caso de que la descarga eléctrica se produzca entre la estructura pequeña 111a y la pieza 12 de trabajo, se determina que el área instantánea de la superficie erosiva es conforme al tipo de dimensión de microescala, paso 205. En caso de que la descarga eléctrica se produzca entre la estructura grande 111b del electrodo compuesto 110 y la pieza 12 de trabajo, se determina que el área instantánea de la superficie erosiva es conforme al tipo de dimensión de mesoescala, paso 205.

En algunas realizaciones, la correspondencia entre la tensión de descarga analizada y el tipo de área instantánea de la superficie de erosión asociada se realiza directamente y/o mediante la aplicación de una función matemática o un filtro, tal como un filtro HF/LF.

En base al tipo de dimensión que se ha determinado del área instantánea de la superficie erosiva de la respectiva estructura dada, es decir, la estructura pequeña 111a o la estructura grande 111b, se establece un conjunto optimizado asociado de parámetros de la tecnología de proceso, paso 206. En la presente realización existen al menos dos conjuntos predefinidos diferentes de parámetros de la tecnología de proceso, almacenados en el aparato 1 de MDE, por ejemplo un patrón 33 de descargas para mesoescala, que se ilustra en la Figura 3, y un patrón de descargas para microescala, por ejemplo uno de los patrones 14, 17, 21, 24 de descargas para microescala, como se ilustra en las Figuras 11a-d, que se explican con más detalle a continuación. La presente invención no está limitada a este respecto, sino que, en general, se pueden predefinir patrones de impulsos de descarga o una relación entre al menos dos tipos de descarga diferentes (basados en la duración del pulso) para cualquier tipo de tipo de dimensión distinto, como también se ha discutido más arriba.

Se adapta el conjunto de parámetros de la tecnología de proceso, basándose en el área instantánea que se ha determinado de la superficie erosiva donde se está produciendo la chispa actual. Se puede prolongar o acortar o mantener inalterada la duración de pulso de esta chispa. Además, se puede prolongar, acortar o mantener inalterada la duración de la pausa después de la descarga actual especificada, paso 207.

Además, se puede seleccionar un tren específico de impulsos durante la descarga actual, basándose en la información de tensión de descarga, y se puede aplicar al hueco 13 de mecanizado, donde la descarga especificada

puede ser parte del tren de impulsos seleccionado o bien se puede aplicar un tren de impulsos separado al término de la descarga especificada, paso 208. El tren de impulsos específico se forma basándose en el conjunto de parámetros de la tecnología de proceso que se han establecido en base al área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado. Se pueden adaptar diversos parámetros del tren de impulsos específico, tales como parámetros para pulsos subsiguientes y, por ejemplo, el número de tales impulsos dentro del tren de impulsos. También se puede añadir una sección de pico de corriente a los impulsos de descarga de corriente para la descarga eléctrica actual y/o impulsos de descarga subsiguientes.

Como alternativa o en combinación con los pasos 206-208, para al menos un nivel de tensión de descarga distinto, se generan al menos dos tipos diferentes de pulsos (basándose en la duración de pulso) y se mantiene constante la relación entre los mismos, en un valor especificado dentro de una tolerancia dada, paso 209. Como ya se ha discutido más arriba, un primer tipo de impulso de descarga provoca la formación de una capa protectora sobre el electrodo de herramienta, mientras que un segundo tipo provoca desgaste en el electrodo de herramienta y su capa protectora, respectivamente.

En algunas realizaciones, en lugar de utilizar parámetros predefinidos de la tecnología de proceso, también se pueden generar dinámicamente los parámetros para llevar a cabo funciones definidas en lo que antecede. Por ejemplo, también se puede utilizar un mecanismo de control y/o supresión del arco para generar dinámicamente al menos dos tipos distintos de descarga dentro del proceso. En otras realizaciones, también se utiliza una combinación de parámetros de la tecnología de proceso predefinidos y generados dinámicamente.

Los pasos 201-209 se repiten durante el mecanizado hasta que finaliza el proceso de mecanizado.

En lo que sigue se explican los patrones de impulsos de descarga para la estructura grande 111b y la estructura pequeña 111a.

La Figura 3 muestra un patrón 33 de impulsos de descarga que está optimizado para estructuras de macroescala o mesoescala, como la estructura 111b del electrodo 110 de herramienta. La Figura 3 visualiza la duración de impulso de los impulsos de descarga sobre el eje x y una corriente de descarga de los impulsos de descarga sobre el eje y. El patrón 33 de impulsos de descarga tiene trenes 34 de impulsos y pausas 35 de impulso entre los trenes 34 de impulsos. Cada tren 34 de impulsos tiene tres impulsos 37 de descarga aplicados, en donde los impulsos 37 de descarga pueden tener la misma duración de impulso. Los impulsos 37 de descarga están separados entre sí por una pausa 36 de impulso entre uno y otro. La pausa 35 de impulso entre los trenes 34 de impulsos es más prolongada que la pausa 36 de impulso entre los diversos impulsos 37 de descarga dentro de un tren 34 de impulsos, de manera que hay tiempo suficiente para la recuperación del hueco 13 de mecanizado entre la aplicación de trenes consecutivos 34 de impulsos, y para mantener la densidad de corriente deseada durante el mecanizado.

Las Figuras 11a a 11d ilustran diferentes trenes de impulsos que se utilizan en diferentes patrones de impulso para áreas instantáneas de microescala de la superficie erosiva en diferentes realizaciones. Las Figuras 11a a 11d visualizan la duración de impulso del tren de impulsos sobre el eje x y la corriente de descarga del tren de impulsos sobre el eje y.

La Figura 11a ilustra un tren 14 de impulsos que tiene un impulso 15 de descarga de primer tipo para formar una capa protectora sobre el electrodo 111a de herramienta, como se ha discutido más arriba, y tres impulsos 16 de descarga de segundo tipo consecutivos, con menor duración de pulso, a fin de erosionar la capa protectora sobre el electrodo 111a de herramienta y la pieza 12 de trabajo, como se ha discutido más arriba. Los impulsos 15 y 16 de descarga tienen una forma rectangular. La corriente de descarga es la misma para los impulsos 15 y 16 de descarga del tren 14 de impulsos.

Por otra parte, también el tiempo en apagado entre el impulso 15 de descarga para formar la capa protectora y el primer impulso 16 de descarga erosiva, así como entre los impulsos individuales 16 de descarga erosiva son idénticos en la presente realización.

Se aplica el tren 14 de impulsos a la superficie pequeña 111a del electrodo 110 de herramienta a fin de efectuar el correspondiente mecanizado de la pieza 12 de trabajo.

Entre la aplicación de trenes 14 de impulsos individuales se puede aplicar un tiempo en apagado. Durante el tiempo en apagado, el hueco de mecanizado, el electrodo de herramienta y la pieza de trabajo se recuperan, de forma que en algunas realizaciones la velocidad de mecanizado global es mayor que en realizaciones en las que no existe tiempo en apagado, o existe sólo un pequeño tiempo en apagado, entre trenes de impulsos individuales. Esta duración de pausa también mantiene la densidad de corriente en el valor deseado sobre un área instantánea dada de la superficie erosiva.

Como se ha mencionado más arriba, las duraciones de impulso, los tiempos en apagado entre los impulsos, el número de impulsos de descarga erosiva, la corriente de descarga, el tiempo en apagado entre trenes de impulsos, el tipo de pulso (corriente inicial, corriente final, trayecto seguido para el incremento de corriente), etc., dependen,



entre otras cosas, de los materiales utilizados para el electrodo de herramienta y la pieza 12 de trabajo, y de la forma del electrodo 11 de herramienta, del dieléctrico, etc. Estos parámetros pueden ser prealmacenados y/o prefijados en el aparato 1 de MDE con penetración de matriz. En otras realizaciones, se pueden determinar de forma dinámica estos parámetros, por ejemplo mediante el análisis de parámetros de mecanizado tales como las variaciones en la tensión de descarga y/o el tiempo de retardo de ignición.

En algunas realizaciones, también se pueden utilizar otros trenes de impulsos:

Por ejemplo, en algunas realizaciones un tren 17 de impulsos, como se ilustra en la Figura 11b, que es similar al tren 14 de impulsos de la Figura 11a, tiene un impulso 18 de descarga formador de capa protectora y tres impulsos 19 de descarga erosiva que tienen cada uno una sección 20 de pico. Las secciones 20 de pico comprenden un pico en la corriente de descarga, que tiene mayor corriente que las restantes secciones de cada uno de los impulsos 19 de descarga erosiva. Esta elevada corriente de pico mejora la velocidad de mecanizado en algunas realizaciones, ya que la elevada corriente de descarga permite una erosión acrecentada de la pieza 12 de trabajo y/o del electrodo de herramienta, respectivamente.

Tal como se ilustra en la Figura 11c, en algunas realizaciones un tren 21 de impulsos, que es similar al tren 14 de impulsos de la Figura 11a, tiene un impulso 22 de descarga para capa protectora seguido de tres impulsos 23 de descarga erosiva con polaridad negativa. El cambio en la polaridad entre el primer impulso 22 de descarga del tren 21 de impulsos y los impulsos 23 de descarga erosiva intensifican la erosión de la capa protectora sobre el electrodo 11 de herramienta.

Tal como se ilustra en la Figura 11d, en algunas realizaciones un tren 23 de impulsos tiene un primer impulso 25 de descarga y tres impulsos 26 de descarga erosiva que se generan por medio de una descarga capacitiva. Los impulsos 26 de descarga erosiva tienen una polaridad negativa. En este caso, también el impulso 25 de descarga del primer tipo puede tener polaridad negativa.

Para mejorar aún más la velocidad de mecanizado y/o reducir el desgaste de la herramienta, en algunas realizaciones, como se ilustra en la Figura 12a, un impulso 27 de descarga de primer tipo con mayor duración  $T_L$  para acumulación de la capa protectora tiene una sección 28 de arista creciente y una sección constante 29. La sección 28 de arista creciente comienza con una corriente de descarga inicial más baja, y la corriente de descarga va aumentando hasta llegar a la corriente final  $I_L$  de la región 29 de corriente constante del impulso 27 de descarga.

Un corto impulso 30 de descarga erosiva, como se ilustra en la Figura 12b, tiene una corriente creciente a lo largo de toda la duración  $T_S$  del impulso. La corriente aumenta desde una corriente mínima  $I_{min}$  de descarga inicial hasta una corriente máxima  $I_S$ . El corto impulso 30 de descarga provoca desgaste en el electrodo 11 de herramienta y la pieza 12 de trabajo, como se ha discutido más arriba. La corriente de descarga creciente desde  $I_{min}$  hasta  $I_S$  intensifica la erosión del electrodo 11 de herramienta y la pieza 12 de trabajo, respectivamente. El trayecto 28 de incremento de la corriente también hace posible aquí aplicar una corriente final superior por pulso. Tales trayectos de incremento de corriente también pueden hacer más rápida la estabilización de la tensión de descarga de la chispa en algunas realizaciones y, por lo tanto, pueden facilitar una ventana de medición de la tensión de descarga en el transcurso de escasos microsegundos después de la disrupción.

En algunas realizaciones, y también para pulsos de tipo transistor, mediante la reducción del ruido de conmutación se puede disminuir la dispersión de valores de la tensión de descarga, lo que se traduce en un mejor análisis de la información de tensión de descarga.

Los perfiles discutidos más arriba del impulso largo 27 (Figura 12a) y del impulso corto 30 (Figura 12b) se pueden aplicar a cualquier tipo de trenes de impulsos, y en particular a los trenes 14, 17, 21 y 24 de impulsos, como se ilustra en las Figuras 11a a 11d y como se ha discutido más arriba.

A continuación se describen aspectos del análisis de tensión y/o corriente de descarga:

Las Figuras 5a y 5b muestran una realización de un método de medición de información de tensión de descarga. Las Figuras 5a y 5b ilustran la tensión de descarga (sección superior) y la corriente de descarga (sección inferior) sobre el eje y como una función del tiempo (eje x).

En algunas realizaciones, se puede utilizar una ventana 84 de medición (Figura 5b) para medir la tensión de descarga actual de la chispa actual. Esta ventana 84 de medición mostrada en la Figura 5b puede tener un único valor de medición de tensión o múltiples valores de medición de tensión como una función del tiempo. Se puede predefinir esta ventana 84 de medición para que comience en un momento  $T_{out}$  después de la disrupción de la descarga eléctrica, que se indica con el signo de referencia 82 en la Figura 5b. El valor típico de  $T_{out}$  se sitúa entre  $0,1 \mu s$  y  $250 \mu s$ , al final de los cuales se aplica una ventana 84 de medición durante una duración de tiempo definida  $T_{mes}$  83, como se muestra en la Figura 5b.

El valor de  $T_{mes}$  puede estar prefijado, y puede definirse en términos de tiempo ( $\mu s$ ) o en términos de número de valores de tensión de descarga (por ejemplo, 10 valores) adquiridos con una tasa de muestreo dada (por ejemplo, cada 1  $\mu s$ ). El valor o los valores de tensión de descarga medidos se utilizan entonces directamente para indicar el área instantánea de la superficie erosiva en la que se está produciendo una chispa, y se aplica al hueco 13 de mecanizado un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso optimizado para el área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado, ya sea durante la misma descarga o al término del pulso de descarga.

En otra realización, se someten a operaciones matemáticas los valores de tensión de descarga. Por ejemplo, se usan un filtro HF o filtro LF o ambos para adquirir información de tensión de descarga con el fin de determinar el área instantánea de la superficie erosiva de una descarga dada. Como se ha mencionado más arriba, se aplica entonces el conjunto adecuado de parámetros de la tecnología de proceso.

En otras realizaciones más, se determinan un valor máximo 80 y un valor mínimo 81 de tensión de descarga basándose en mediciones, o bien se utilizan comparadores, en lugar de capturar valores de tensión de descarga para la adaptación de parámetros de la tecnología de proceso.

La Figura 6 ilustra el mismo método de medición para dos áreas distintas 41, 42 de superficie sobre un único electrodo 40 de herramienta. En esta realización, durante una descarga de chispa, la tensión de descarga de la chispa varía dependiendo de la ubicación de la chispa, es decir, de que aparezca en el área superficial mayor 41 o bien en el área superficial más pequeña 42. Dependiendo de la información de tensión de descarga detectada, se establece un conjunto apropiado de parámetros de la tecnología de proceso para las áreas superficiales respectivas 41 y 42, y se aplica al hueco 13 de mecanizado ya sea durante el mismo impulso de descarga o bien al término del impulso de descarga.

La Figura 7a muestra una realización de una adaptación de parámetros de la tecnología de proceso en donde, después de recopilar la información de tensión de descarga dentro de una ventana 44 de medición, la duración del impulso (actual) dado, que tenía originalmente una longitud 47, se mantiene inalterada o bien se prolonga 45 o se acorta 46 dependiendo de los valores predefinidos, almacenados en el equipo 1 de MDE, que se correlacionan con correspondientes áreas instantáneas de la superficie erosiva en las se está produciendo una chispa.

En la Figura 7b se muestra otra realización de una adaptación de parámetros de la tecnología de proceso, en donde después el análisis de la tensión de descarga dentro de una ventana 48 de medición, se puede cambiar o dejar inalterada la duración de pulso de un impulso, como se ha descrito en relación con la Figura 7a. Sin embargo, en esta realización adicionalmente se puede alterar, es decir prolongar o acortar, la duración de la pausa que sigue al impulso analizado, o bien mantenerla inalterada, con el fin de mantener la estabilidad del proceso y conseguir una densidad de corriente deseada sobre el área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado, en base a la información de tensión adquirida de la ventana 48 de medición. El impulso posterior tiene también una ventana 58 de medición, que determina, además, una adaptación de parámetros de la tecnología de proceso basada en la información de área instantánea de la superficie erosiva indicada.

En otra realización más, la adaptación de parámetros de la tecnología de proceso basada en el área instantánea de la superficie erosiva detectada, procedente de la información de tensión de descarga, comprende la formación de un tren de impulsos específico. Como se muestra en la Figura 7c, dependiendo de la información de tensión de descarga analizada adquirida durante una ventana 53 de medición, se puede cambiar o dejar inalterada la duración del impulso dado. Además, el impulso analizado puede considerarse una parte de un tren de impulsos que tiene impulsos 57, 59, 60 con parámetros predeterminados, y se puede alterar mediante un control el número de tales impulsos 57, 59, 60 y aplicarlos al hueco 13 de mecanizado, después del impulso dado para el cual se ha adquirido y analizado la información de tensión de descarga. En este caso, se puede aplicar la ventana de medición de tensión de descarga o bien excluir dicha medición para los pulsos 57, 59, 60. Después de la duración de pausa determinada seguida por el último pulso 60 del tren de impulsos, se aplica un pulso estándar para un ciclo de mecanizado dado que tenga una ventana 56 de medición, a fin de adaptar nuevamente los parámetros de la tecnología de proceso para el área instantánea de la superficie erosiva que se detecte.

La Figura 7 representa una realización adicional de un método de control del proceso, donde se aplica al menos una ventana 61 de medición que puede estar en paralelo o antes de otra ventana 63 de medición. El propósito de la ventana 63 de medición puede ser el mismo que el de la ventana 61 de medición, o bien se puede utilizar para otros aspectos de un control de proceso adaptativo. Por ejemplo, en la presente realización se puede aplicar la ventana 63 de medición con duración  $T_m$  65 a la detección de una transición de arco durante la descarga de chispa. En este caso, de forma individual o combinada con información procedente de la ventana 61 de medición, se puede utilizar información de la ventana 63 de medición para adaptar parámetros de la tecnología de proceso o bien para detener un mayor desarrollo de arco mediante el acortamiento de una duración original 62 de pulso a una duración 64 de impulso, evitando así daños a la pieza 12 de trabajo.

La Figura 8 ilustra otra realización más de adaptación de parámetros de la tecnología de proceso basada en el análisis de la información de tensión de descarga. En esta realización, un electrodo de herramienta sin características notorias de distintas áreas de la superficie puede presentar chispas con distinto valor de tensión de

descarga. Se identifican al menos dos tipos diferentes de descarga basándose en el análisis de la información de tensión de descarga durante el proceso de mecanizado. Como se muestra en la Figura 8, si la chispa se produce en la esquina o borde 66 del electrodo de herramienta, la información 71 de tensión de descarga respectiva durante al menos una ventana 69 de medición será diferente de la misma información de tensión de descarga de una chispa que se produzca en una cara frontal 67 o cara lateral 68 del electrodo de herramienta. Por lo tanto, mediante el análisis de al menos dos informaciones distintas de tensión de descarga se pueden adaptar correspondientemente los parámetros de la tecnología de proceso, por ejemplo en la forma descrita más arriba, con el fin de presentar un menor desgaste de esquina y de borde del electrodo de herramienta, con el fin de conseguir un menor subtamaño y una mayor velocidad de arranque de material.

La Figura 9 ilustra la información de tensión de descarga indicativa del área instantánea de la superficie erosiva, ventanas de medición y la variación de una tensión de descarga respectiva en función de un área instantánea asociada de la superficie erosiva. Aquí, el eje horizontal representa la duración del impulso de descarga en microsegundos y el eje vertical representa la tensión de descarga en voltios.

Cuando se aplica un impulso 80 de descarga para una corriente dada por pulso y un tipo específico de impulso, después de una duración 81 de tiempo, la tensión de descarga de la chispa se estabiliza en un valor que se puede medir mediante al menos una ventana 78 de medición durante una duración 82 de tiempo después de un tiempo 81 en apagado. En la presente realización, la información de tensión de descarga medida en los respectivos intervalos 73, 74 y 75 es indicativa de un área instantánea de la superficie erosiva de macroescala, mesoescala o microescala. Además, existen valores 72 de tensión que están por encima de los valores de descarga normales. Las descargas de arco tienen una tensión de descarga inferior en comparación con la tensión de descarga de descargas 76 de chispa, mientras que los impulsos de cortocircuito tienen una tensión 77 de descarga más baja.

La capacidad de determinar el área instantánea de la superficie erosiva y la resolución dependen principalmente de la capacidad de resolución de las mediciones de tensión. En algunas realizaciones, por ejemplo, con una resolución de 0,1 a 1 V se pueden detectar múltiples características del área instantánea de la superficie erosiva dentro del grupo 73 de niveles de tensión de descarga. Una chispa sobre un área instantánea de la superficie erosiva de 100 mm<sup>2</sup> tendrá una tensión de descarga mayor en comparación con una chispa sobre un área instantánea de la superficie erosiva de 30 mm<sup>2</sup>, a pesar de pertenecer al mismo grupo 73 que está asociado con el tipo de macroescala del área instantánea de la superficie erosiva. Esto permite una adaptación de parámetros de la tecnología de proceso no sólo al nivel de microsegundos o al nivel de chispa individual, sino también una adaptación de parámetros de la tecnología de proceso con elevada precisión para los cambios más pequeños en el área instantánea de la superficie erosiva dentro de un grupo de tensiones de descarga, como 73 o 74 o 75. Además, en algunas realizaciones se puede utilizar información de la tensión de descarga de alta frecuencia (HF) o de baja frecuencia (LF) para detectar el tipo de área instantánea de la superficie erosiva en la que se produce una chispa en tiempo real.

Adicionalmente, la Figura 9 muestra una segunda ventana 79 de medición, aparte de la ventana 78 de medición, que se utiliza en algunas realizaciones para otros aspectos de control adaptativo del proceso. Esta ventana 79 de medición con la longitud 84 de tiempo se aplica después de una duración 83 de tiempo. La adaptación de parámetros de la tecnología de proceso se basa, por ejemplo, en la detección de arco y el control para evitar daños en la pieza de trabajo debidos a la formación de arcos. Los valores típicos para la ventana 81 de tiempo se sitúan entre 0,1 µs y 1 ms, para la ventana 82 de tiempo entre 0,1 µs y 1 ms, y para la ventana 83 de tiempo entre 0 µs y 1 ms y para la ventana 84 de tiempo entre 0,1 µs y 1 ms.

La Figura 10 ilustra diferentes realizaciones de electrodos de herramienta, tales como un electrodo de herramienta sencillo, un electrodo de herramienta por lotes, un electrodo de herramienta compuesto, un electrodo de herramienta especial con diferentes áreas de superficie y/o formas de sección transversal tales como poligonal, circular, etc.

La Figura 13a, tomada del documento US 4,376,880 A, muestra una tensión media de hueco o tensión de descarga para diferentes estados de plasma, tales como plasma de fase gaseosa, plasma de fase metálica, modo de arco o cortocircuito. La Figura 13b, por su parte, ilustra la evolución de dichos estados de plasma a lo largo de la duración del pulso durante una descarga individual.

La Figura 14, tomada de la referencia "Boddy" mencionada más arriba, muestra un ejemplo de diferentes tensiones de descarga en función del estado de plasma para plasma de chispa generado durante la apertura de contactos eléctricos a lo largo de valores de tiempo superiores.

La Figura 15a muestra una realización en donde la tensión de descarga tiene tres niveles de tensión de descarga separados durante la misma descarga, y la Figura 15b ilustra un ejemplo de descarga de chispa con inestabilidades que pueden dañar una pieza de trabajo y/o un electrodo de herramienta.

La Figura 16 representa una realización de una estrategia de tipo "detectar y adaptar" de medición del proceso mediante la aplicación de pulsos piloto a un electrodo de herramienta, tal como se muestra en la Figura 6 o la Figura 8. Aquí se muestra una muestra muy pequeña del proceso completo, en el cual se aplican y se utilizan pulsos piloto

5 para detectar el área instantánea de la superficie erosiva de la descarga. Por ejemplo, con un pulso piloto 91, una ventana 90 de medición indica un área instantánea 41 de la superficie erosiva de descarga para la Figura 6 y, por lo tanto, se aplica un conjunto respectivo de parámetros de la tecnología de proceso en forma de tren 92 de impulsos de descarga. Se aplica nuevamente otro impulso piloto 94 en función de las ventanas de medición durante la aplicación del conjunto 92 de parámetros de tecnología, o bien después de un intervalo predeterminado tras un punto temporal 91 predefinido. Allí, otra ventana 93 de medición indica que se produce una chispa en otra superficie erosiva instantánea 42 (Figura 6). De esta manera, basándose en conjuntos predeterminados de parámetros de la tecnología de proceso almacenados en una base de datos, un control de proceso adapta o selecciona el correspondiente conjunto de parámetros de la tecnología de proceso y genera, de acuerdo con el conjunto seleccionado de parámetros de la tecnología de proceso, un tren definido 95 de impulsos, que está optimizado para el área instantánea 42 de la superficie erosiva según la Figura 6. en el transcurso de escasos microsegundos después de la ventana 93 de medición.

15 La aplicación de pulsos piloto constituye en este caso sólo un aspecto, donde incluso los pulsos de tecnología seleccionados pueden actuar como pulsos piloto y también como pulsos de mecanizado, y realizar la misma adaptación de control de proceso con el fin de aumentar la velocidad de arranque de material, disminuir el desgaste de herramienta, incluso para áreas instantáneas de la superficie de tipo meso y micro, conseguir un proceso estable, reducir las necesidades de recursos tales como número de electrodos requeridos, conseguir el diámetro interior más pequeño de la cavidad de máquina, lograr una elevada precisión y exactitud de forma y por lo tanto mejorar las prestaciones globales del proceso.

25 Aunque la presente invención se ha descrito con relación a un número limitado de realizaciones, es evidente que se pueden admitir modificaciones y variantes que no se aparten del concepto y alcance de la invención, que serán entendidas fácilmente por los expertos en la técnica. Se considera que todas estas modificaciones y variantes no se apartan del concepto y alcance de la invención, definidos por las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para controlar un aparato (1) de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) que tiene al menos un electrodo (11, 110) de herramienta y una pieza (12) de trabajo, comprendiendo el método los pasos de:
- situar (201) el electrodo (11, 110) de herramienta con respecto a la pieza (12) de trabajo, definiendo con ello un hueco (13) de mecanizado entre el electrodo (11, 110) de herramienta y la pieza (12) de trabajo;
  - generar (202) al menos un impulso de descarga;
  - aplicar (203) el al menos un impulso de descarga al hueco (13) de mecanizado, generando con ello una descarga eléctrica a través del hueco (13) de mecanizado;
  - analizar (204) la tensión de descarga y/o la corriente de descarga a través del hueco (13) de mecanizado generadas por un impulso piloto de descarga aplicado para la descarga eléctrica actual generada por la aplicación del al menos un impulso de descarga;
  - determinar (205), basándose en el análisis de la tensión de descarga y/o la corriente de descarga del impulso piloto de descarga, el tipo de dimensión de un área instantánea (105) de la superficie erosiva del electrodo (11, 110) de herramienta sobre la cual se genera la descarga eléctrica actual;
  - establecer (206) un conjunto de parámetros de la tecnología de proceso en base al tipo de dimensión que se ha determinado del área instantánea (105) de la superficie erosiva del electrodo (11) de herramienta; y
  - generar impulsos de descarga (37, 15, 16, 18, 19, 22, 23, 25, 26) según los parámetros de la tecnología de proceso que se han establecido y aplicarlos al hueco (13) de mecanizado.
2. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según la reivindicación 1, en donde se establece un primer conjunto (33) de parámetros de la tecnología de proceso cuando el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado es de un primer tipo, y en donde se establece un segundo conjunto de parámetros de la tecnología de proceso cuando el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado es de un segundo tipo, en donde el primer (33) y el segundo (14, 17, 21, 24) conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso son diferentes entre sí y el primer y segundo tipos de dimensión de las áreas instantáneas de la superficie erosiva también son diferentes entre sí.
3. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el electrodo (110) de herramienta comprende al menos dos áreas instantáneas de la superficie erosiva que tienen tipos de dimensión diferentes y/o en donde el electrodo de herramienta comprende al menos dos áreas instantáneas de la superficie erosiva que originan una descarga eléctrica con al menos dos valores distintos de tensión de descarga.
4. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además el paso de determinar el número de áreas instantáneas de la superficie erosiva que tienen tipos diferentes de dimensión, en base al análisis de la tensión de descarga y/o la corriente de descarga.
5. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el área instantánea de la superficie erosiva es al menos una de: una esquina, un borde, una cara lateral o una cara frontal del electrodo.
6. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde un primer tipo de dimensión es indicativo de una estructura del electrodo (110) de herramienta que es menor o igual que  $1 \text{ mm}^2$  y/o que tiene una dimensión por debajo de  $1 \text{ mm}$  y un segundo tipo de dimensión es indicativo de una estructura del electrodo de herramienta que es mayor de  $1 \text{ mm}^2$  y/o que tiene una dimensión por encima de  $1 \text{ mm}$ .
7. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde un primer conjunto (14, 17, 21, 24) de parámetros de la tecnología de proceso está optimizado para un área de la superficie erosiva del electrodo (110) de herramienta que es menor o igual que  $1 \text{ mm}^2$  y un segundo conjunto (33) de parámetros de la tecnología de proceso está optimizado para un área de la superficie del electrodo (110) de herramienta que es mayor de  $1 \text{ mm}^2$ .
8. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la rugosidad superficial a producir en la pieza (12) de trabajo está determinada por el tipo de dimensión del área instantánea de la superficie erosiva que se ha determinado.
9. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el primer y/o segundo conjuntos de parámetros de la tecnología de proceso definen un patrón (14, 17, 21, 24, 33) de impulsos de descarga.
10. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según la reivindicación 9, en donde el conjunto de parámetros de la tecnología de proceso predefine un patrón (14, 17, 21,

- 24) de impulsos de descarga que comprende al menos un impulso (15, 18, 22, 25, 27) de descarga de primer tipo y al menos un impulso (16, 19, 23, 26, 30) de descarga de segundo tipo, en donde el impulso (15, 18, 22, 25, 27) de descarga de primer tipo tiene una duración ( $T_L$ ) de impulso mayor que la duración ( $T_S$ ) de impulso del impulso individual (16, 19, 23, 26, 30) de descarga de segundo tipo y en donde el impulso (15, 18, 22, 25, 27) de descarga de primer tipo origina la formación de una película protectora contra el desgaste sobre el electrodo (11, 110) de herramienta y el impulso (16, 19, 23, 26, 30) de descarga de segundo tipo provoca erosión al menos sobre el electrodo (11, 110) de herramienta.
11. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según la reivindicación 10, en donde se establece el patrón (14, 17, 21, 24) de impulsos de descarga que comprende los impulsos de descarga de primer tipo y de segundo tipo cuando el tipo de dimensión de la superficie instantánea de erosión que se ha determinado es indicativo de un área de superficie de erosión que tiene un área instantánea de superficie menor o igual que  $1 \text{ mm}^2$  y/o que tiene una dimensión por debajo de 1 mm.
12. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según las reivindicaciones 10 y 11, en donde se mantiene constante la relación entre impulsos de descarga de primer y segundo tipo con el fin de provocar un desgaste predefinido sobre el electrodo de herramienta.
13. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además el paso de reducir ruido de conmutación para impulsos que están siendo generados por una fuente lineal de corriente y/o un generador de tipo resistor con el fin de disminuir la dispersión de valores de la tensión de descarga.
14. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además el paso de reducir el tiempo de descarga eléctrica en caso de determinar un valor de tensión de descarga por encima de un valor predefinido.
15. El método para controlar un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde los impulsos (37, 15, 16, 18, 19, 22, 23, 25, 26) de descarga que se están generando según el conjunto establecido de parámetros de la tecnología de proceso se aplican durante la descarga eléctrica actual y/o durante una descarga eléctrica consecutiva que se produce en la misma área instantánea de la superficie erosiva detectada.
16. Un aparato para mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) que comprende:
- un electrodo (11, 110) de herramienta,
  - una mesa (3) de trabajo para recibir una pieza (12) de trabajo,
  - un generador (4) de impulsos para generar impulsos de descarga, y
  - un control (2) para controlar el aparato (1) de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo),
- en donde el control (2) está adaptado para realizar el método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes.
17. El aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) según la reivindicación 16, en donde el aparato es un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) con penetración de matriz o un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) de taladrado o un aparato de mecanizado por descarga eléctrica (electroerosivo) de fresado.

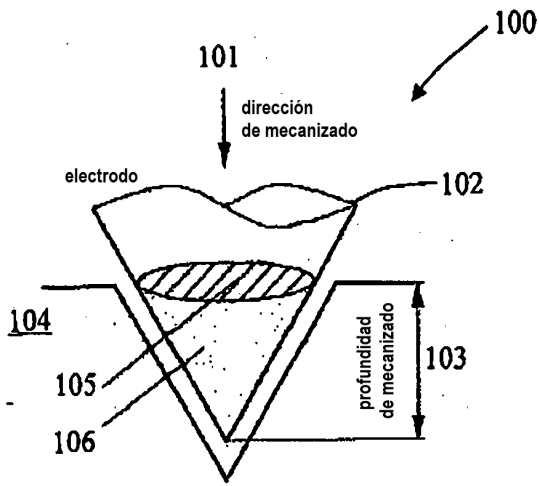


Fig. 1a

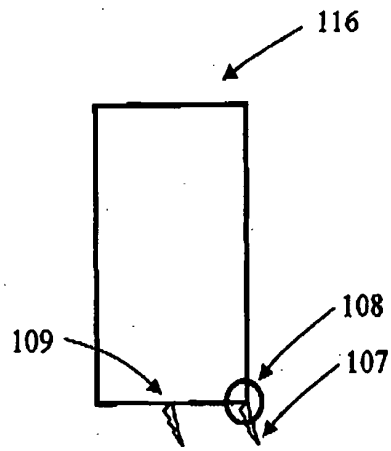


Fig. 1b

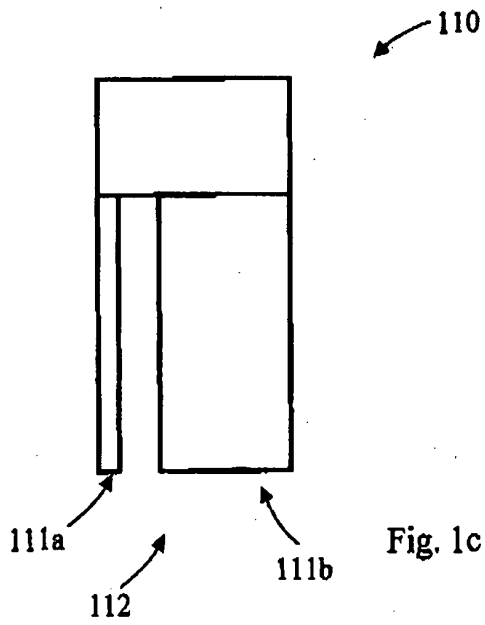


Fig. 1c

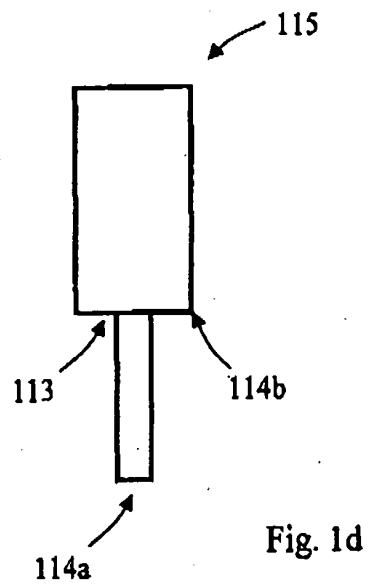


Fig. 1d

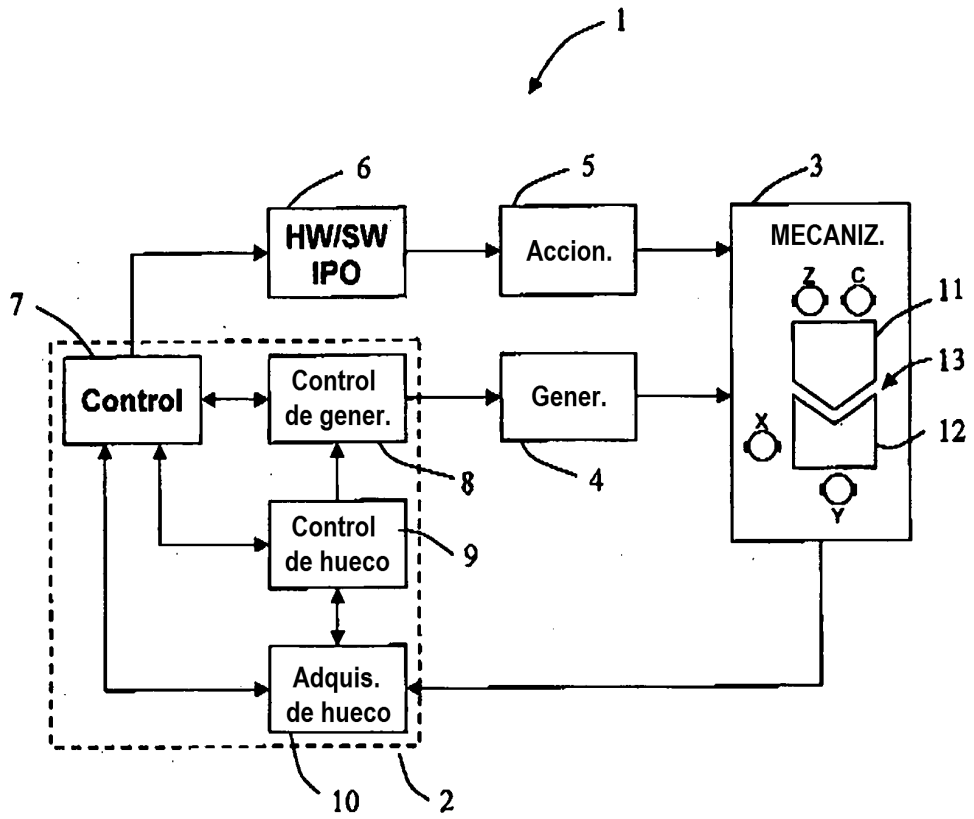


Fig. 2

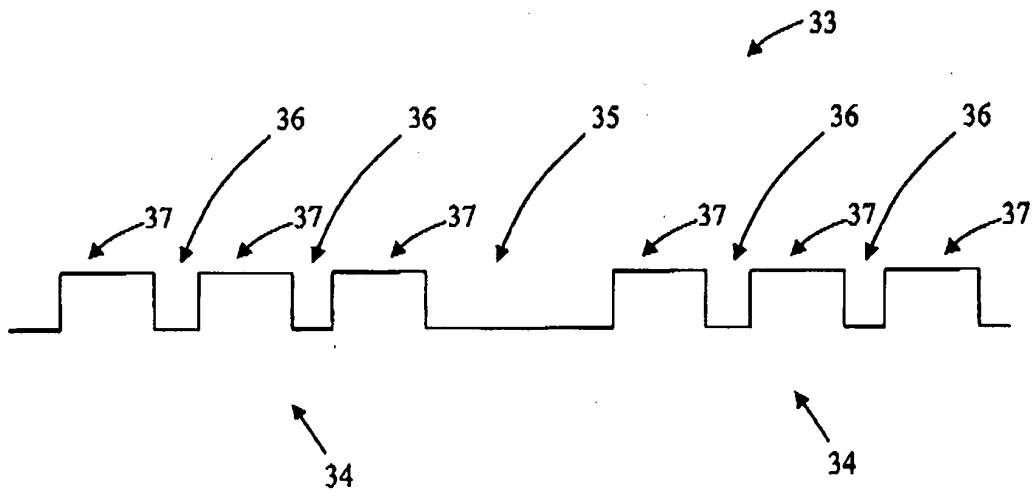


Fig. 3



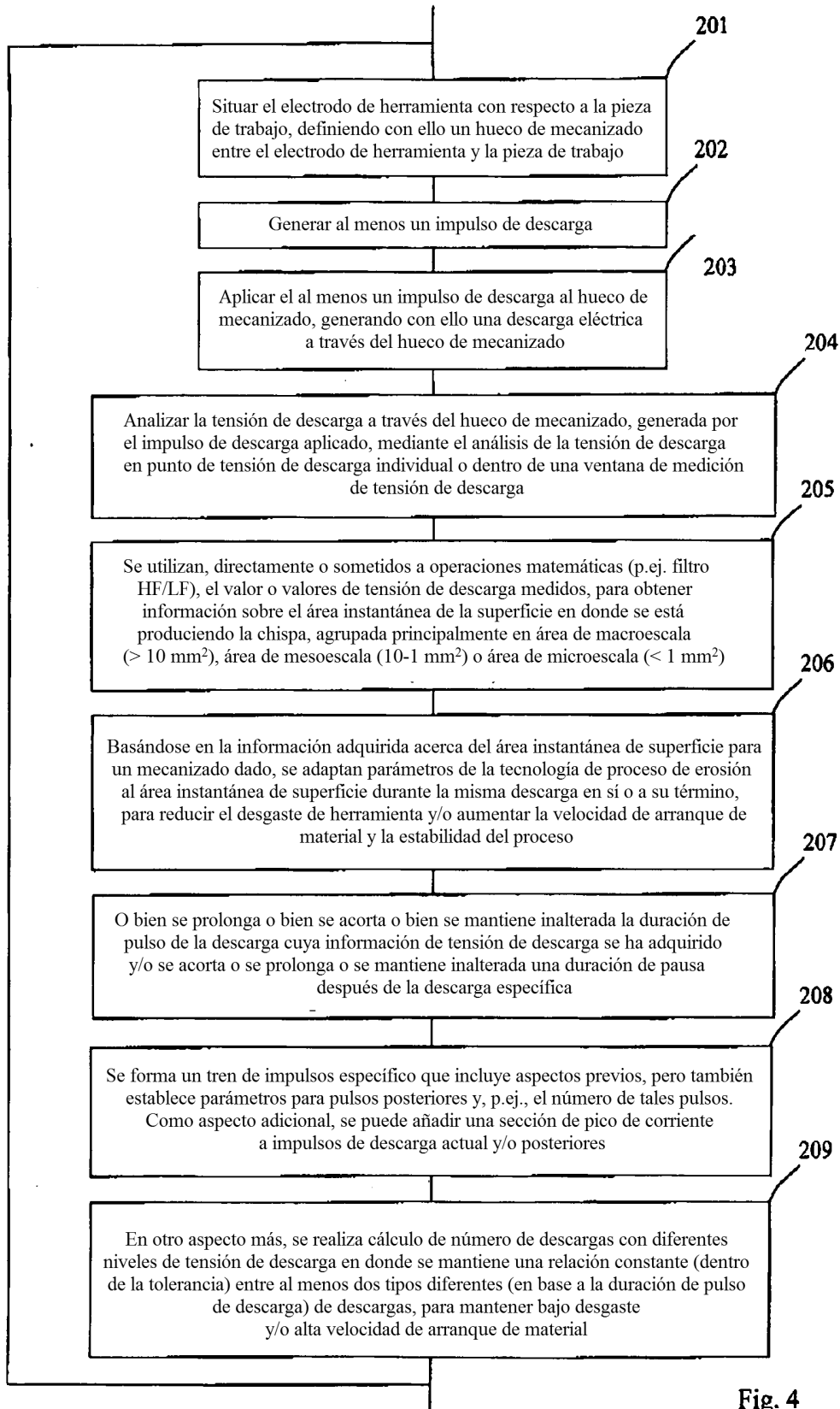


Fig. 4

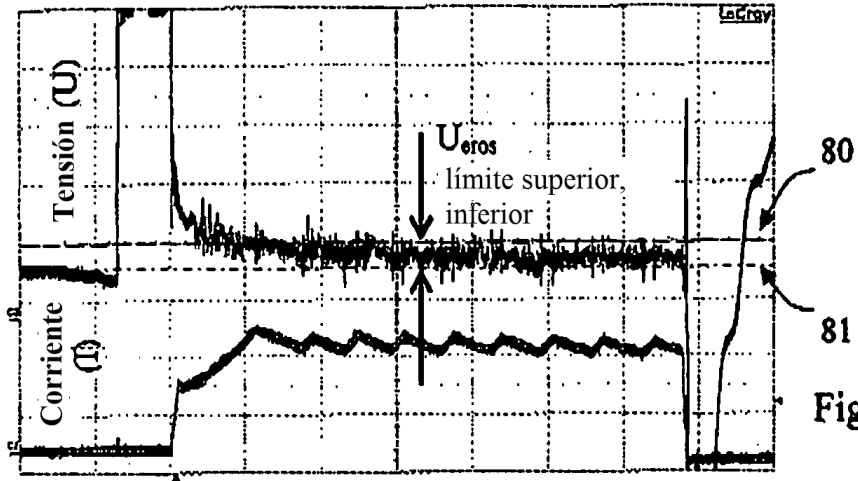


Fig. 5a

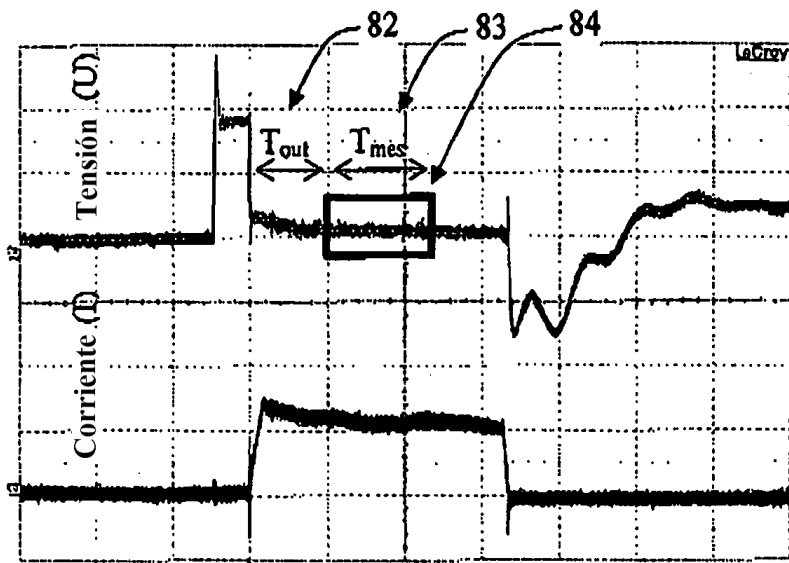


Fig. 5b

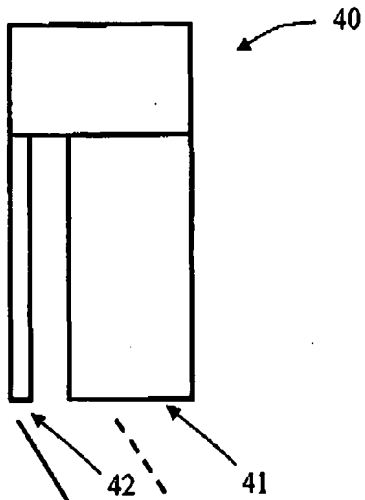


Fig. 6

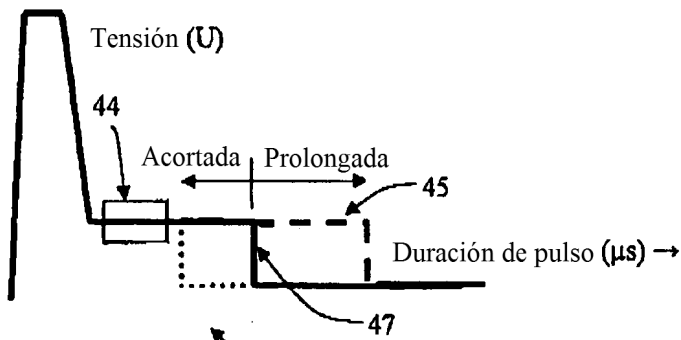
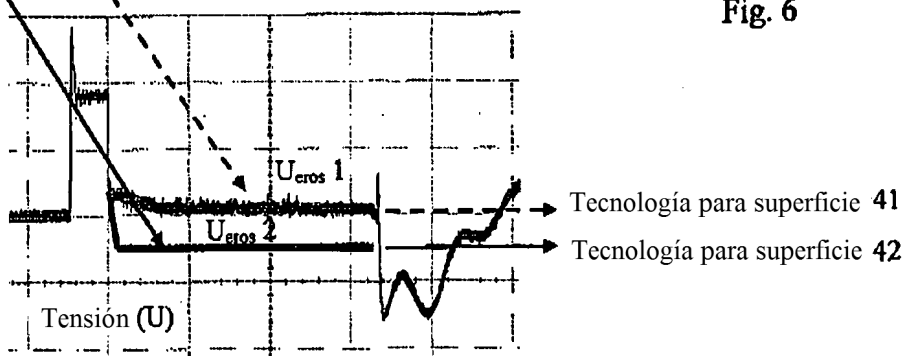


Fig. 7a

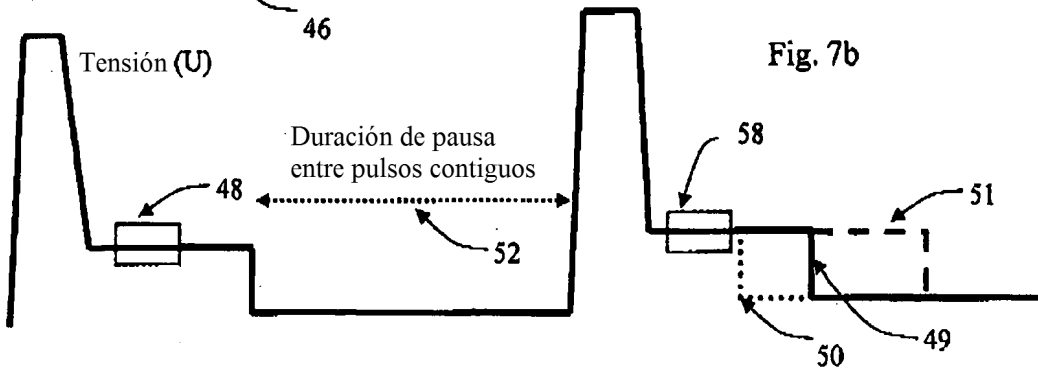


Fig. 7b



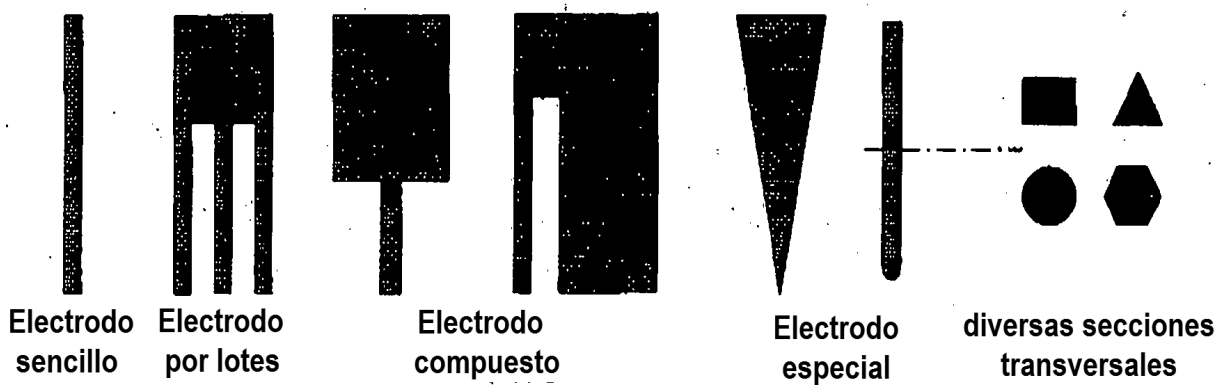
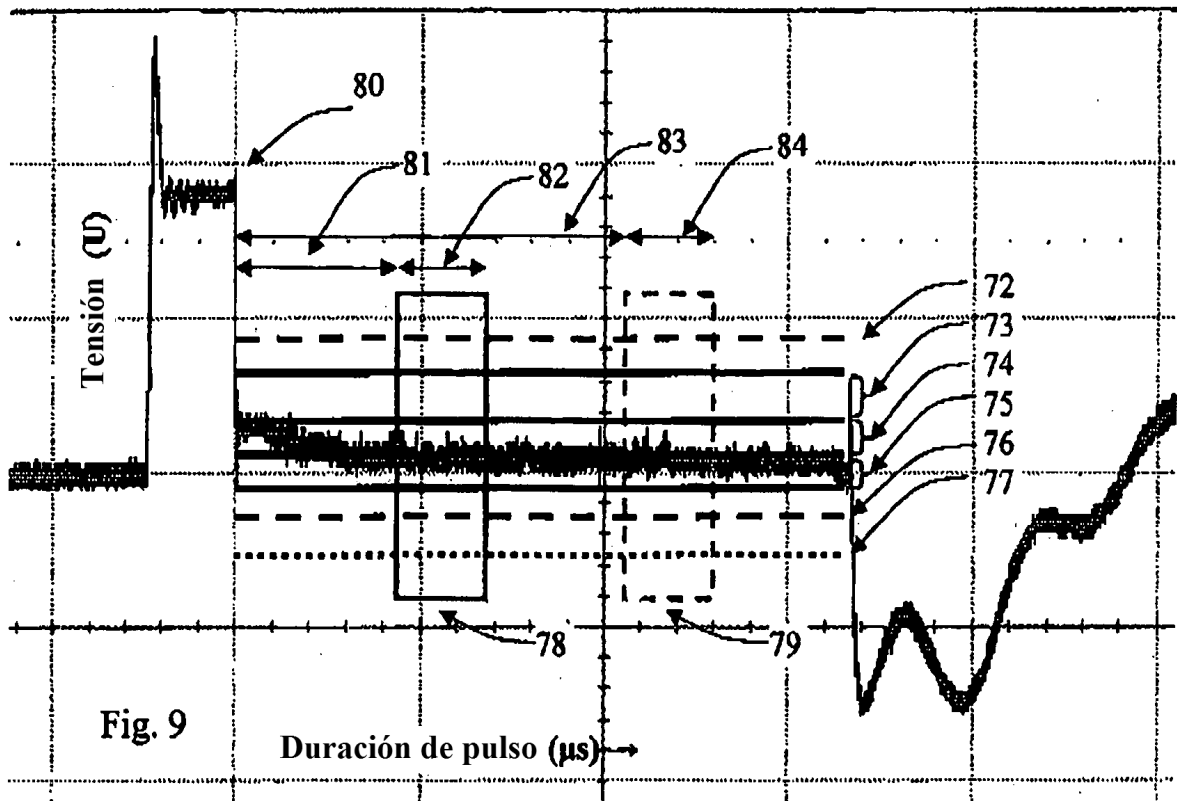


Fig. 10

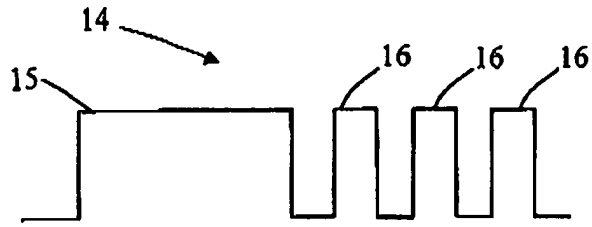


Fig. 11a

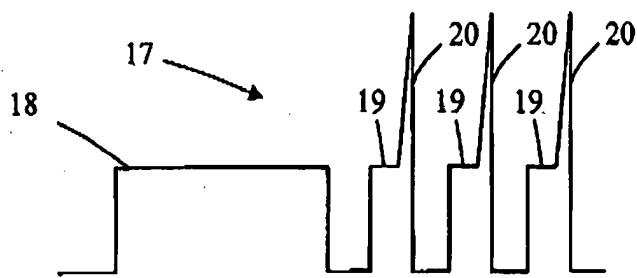


Fig. 11b

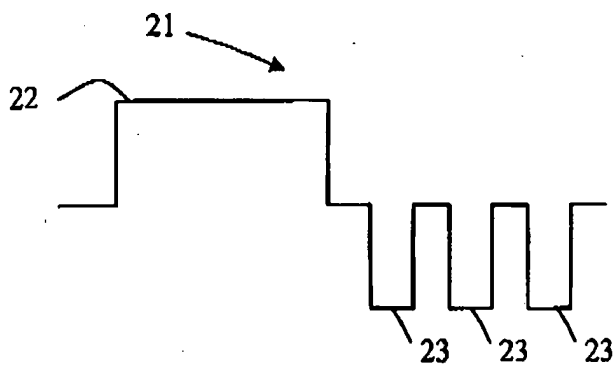


Fig. 11c

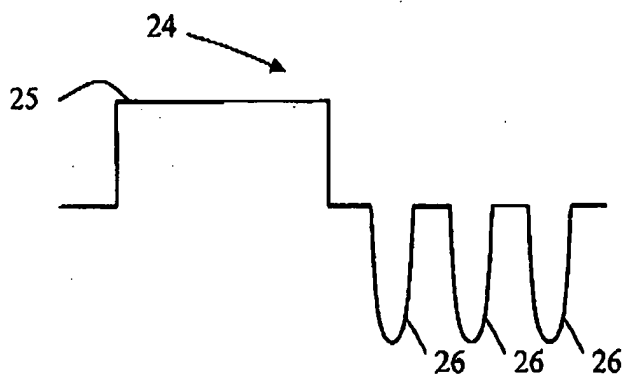


Fig. 11d

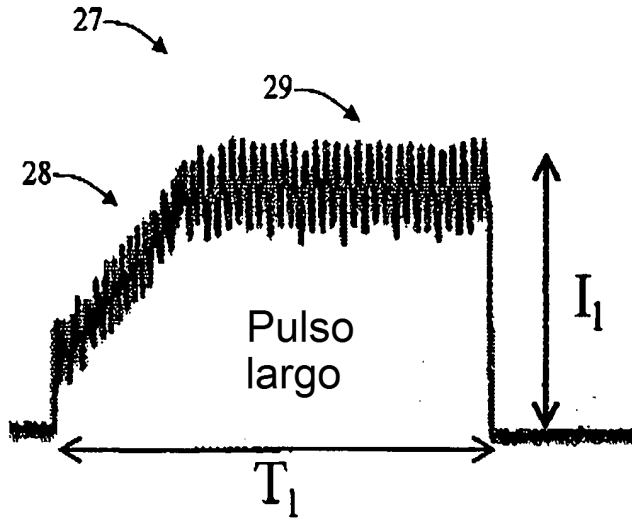


Fig. 12a Acumulación

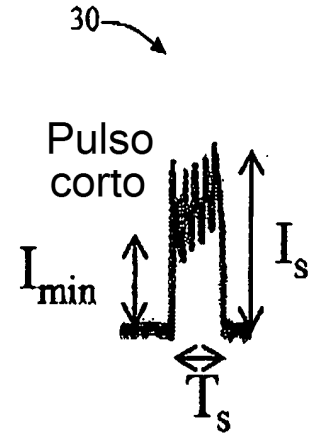


Fig. 12b Desgaste

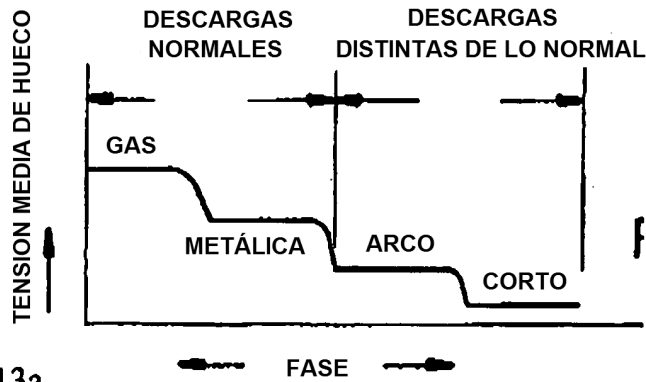


Fig. 13a

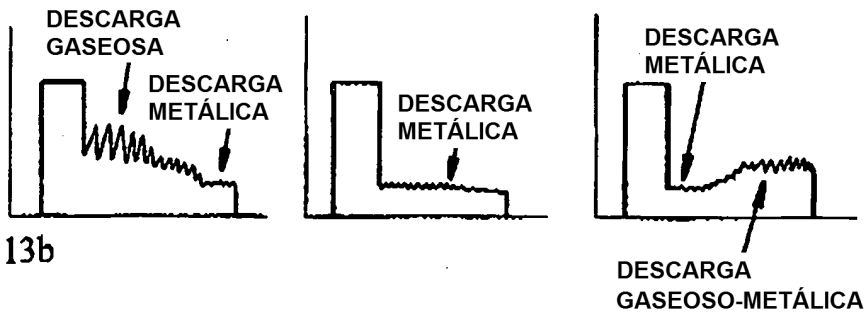


Fig. 13b

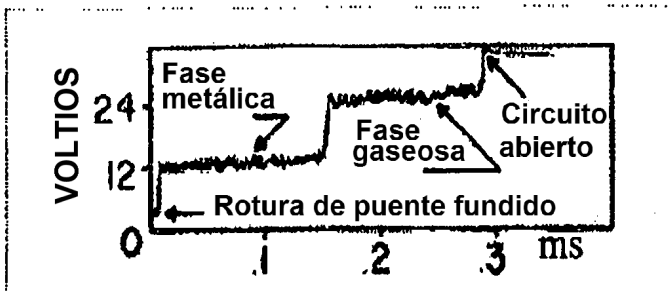


Fig. 14

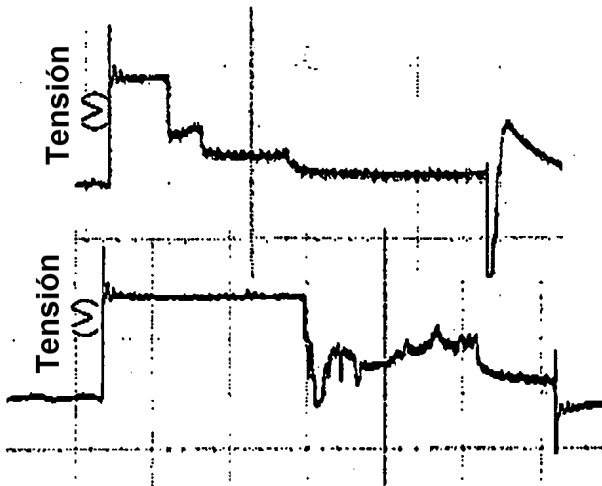


Fig. 15a

Fig. 15b

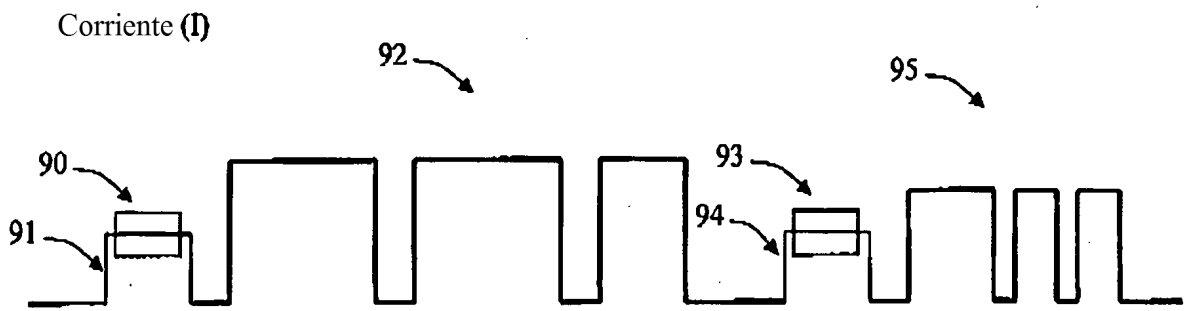


Fig. 16