



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 315 440**

51 Int. Cl.:
B23H 1/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **03007411 .6**

96 Fecha de presentación : **02.04.2003**

97 Número de publicación de la solicitud: **1464430**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **06.10.2004**

54 Título: **Aparato y método para mecanizado por electroerosión.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.04.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.04.2009

73 Titular/es: **AGIE S.A.**
Via dei Pioppi 2
6616 Losone, CH

72 Inventor/es: **Boccardo, Marco;**
Knaak, Reto y
Bonini, Stefano

74 Agente: **Sugrañes Moliné, Pedro**

ES 2 315 440 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

Aparato y método para mecanizado por electroerosión.

5 La presente invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo para el mecanizado electroerosivo de una pieza de trabajo según los preámbulos de las reivindicaciones 1 y 10 de patente.

10 Uno de los problemas principales en el mecanizado electroerosivo consiste en la optimización por un lado de la capacidad de arranque del mecanizado y por otro lado, de la calidad de la superficie de la pieza de trabajo que va a mecanizarse. La pieza de trabajo mecanizada debe presentar una determinada rugosidad final y una determinada precisión de forma. Además se exige una zona de la superficie de la pieza de trabajo influida térmicamente lo más pequeña posible y un desgaste del electrodo lo menor posible. Estas condiciones límite determinan la duración del mecanizado y por tanto, los costes para el acabado de la pieza de trabajo.

15 En el mecanizado electroerosivo, un generador de descargas eléctricas proporciona series de impulsos de erosión controlados al electrodo-herramienta y la pieza de trabajo, que permiten el proceso electroerosivo. Según el estado de la técnica son habituales los siguientes tipos de series de impulsos:

- 20 - series de impulsos en isofrecuencia, tal como se muestran por ejemplo en la figura 1a. En ésta, está representado el desarrollo en el tiempo de la tensión U_{FS} existente en el electrodo-herramienta mediante tres impulsos de erosión sucesivos. Un impulso de erosión está caracterizado por una subida de tensión hasta una tensión en vacío U_i preestablecida, una persistencia de la tensión en vacío U_i que se mantiene constante hasta el disparo del impulso de erosión, una caída de tensión durante la descarga (con una tensión de descarga U_e media) y una interrupción de la descarga con una caída de tensión hasta el valor cero. Tras un impulso de erosión con la duración de tiempo t_i sigue un intervalo entre impulsos t_0 , antes de que se genere un impulso de erosión siguiente. La figura 1b muestra el desarrollo de la corriente I_{FS} en el tiempo correspondiente de la corriente que fluye durante un impulso de erosión al electrodo-herramienta. Este desarrollo de la corriente aumenta durante la descarga hasta un valor de descarga I_e medio que se mantiene constante y disminuye hacia el final del impulso de erosión hasta cero. En el caso de series de impulsos en isofrecuencia la duración del impulso t_i y la duración del intervalo t_0 se mantienen constantes. El comportamiento estocástico del tiempo de retraso de disparo (el tiempo entre la aplicación de la tensión en vacío U_i y la subida de la corriente o la caída de la tensión en vacío) cambia en este método la energía de descarga (la corriente de descarga también se mantiene constante) para cada impulso de corriente, y por tanto el arranque, el desgaste relativo y la rugosidad final.
- 35 - series de impulsos isoenergéticas, tal como se muestran por ejemplo en las figuras 2a y b, en las cuales la duración de descarga t_e y la duración de intervalo t_0 se mantienen constantes. En este caso se consigue una mejor constancia de los resultados tecnológicos. El mecanizado isoenergético consigue en comparación con el mecanizado en isofrecuencia un menor arranque, ya que se utilizan menos impulsos de erosión por unidad de tiempo para el mecanizado.

40 En el estado de la técnica para el mecanizado electroerosivo de piezas de trabajo son habituales además formas de impulsos de corriente rectangulares o trapezoides. Si bien los impulsos de corriente trapezoides presentan frente a los impulsos de corriente rectangulares la ventaja de que el desgaste del electrodo es menor debido a la menor densidad de corriente en la fase de formación del canal de descarga, sin embargo también tienen la desventaja de que el arranque es menor debido a la menor integral de corriente-tiempo.

50 El documento de publicación PCT WO 01/32342 intenta eliminar las desventajas del mecanizado con impulsos de corriente trapezoides, porque tras un tiempo predeterminado desde el inicio de la descarga se conecta adicionalmente un generador de corriente adicional, que superpone al impulso de corriente normal un impulso de corriente muy corto y triangular de elevada energía. El tiempo predeterminado se determina de manera empírica y sirve para reducir la densidad de corriente, para mantener el desgaste del electrodo reducido. Si bien de este modo puede aumentarse el arranque especialmente en el caso del mecanizado de metal duro, sin embargo no puede reducirse simultáneamente el desgaste del electrodo, porque en cada impulso de corriente predominan otras condiciones. El proceso de erosión es concretamente estocástico, de modo que la densidad de corriente para cada impulso de corriente sigue un gradiente propio. Además el uso de un generador adicional es complejo y más caro.

60 El documento US-A-4.700.038 determina el valor de velocidad de la caída de tensión tras activar el intersticio de trabajo y utiliza este valor para determinar el arranque de material de una única descarga y da a conocer las características del preámbulo de las reivindicaciones 1 y 10. Sumado a lo largo de cada una de las descargas calcula además el desgaste del electrodo y a partir de aquí parámetros para ajustar el impulso de erosión, tales como la duración de descarga, intervalo entre impulsos, frecuencia de descarga, etc.

65 El documento DE-A-28 41 596 describe un generador de impulsos con detección de cortocircuito, suprimiendo el impulso de erosión en caso de detectar un cortocircuito. Un cortocircuito se detecta cuando la tensión de descarga ha disminuido en un intervalo de tiempo preestablecido por debajo de la tensión de arco.

ES 2 315 440 T3

La invención se basa en el objetivo de mejorar un procedimiento y un dispositivo para el mecanizado electroerosivo de piezas de trabajo.

La invención soluciona este objetivo en cada caso con los objetos de las reivindicaciones 1 y 10. Configuraciones preferidas de la invención se describen en las reivindicaciones dependientes.

A continuación se explican con más detalle la invención así como características adicionales de la invención mediante ejemplos de realización preferidos con referencia al dibujo adjunto. En el dibujo muestra:

la figura 1 un desarrollo en el tiempo de la tensión (figura 1a) y un desarrollo en el tiempo correspondiente de la corriente (figura 1b) de series de impulsos de corriente en isofrecuencia según el estado de la técnica;

la figura 2 un desarrollo en el tiempo de la tensión (figura 2a) y un desarrollo en el tiempo correspondiente de la corriente (figura 2b) de series de impulsos de corriente isoenergéticas según el estado de la técnica;

la figura 3 un desarrollo en el tiempo de la tensión (figura 3a), un desarrollo en el tiempo correspondiente de la derivada del desarrollo de la tensión (figura 3b) y un desarrollo en el tiempo correspondiente de la corriente (figura 3c) de un impulso de corriente isogeométrico según la presente invención;

la figura 4 un circuito de base esquemático del dispositivo para interrumpir el impulso de erosión según un ejemplo de realización de la presente invención;

la figura 5 desarrollos en el tiempo de la tensión, de tensiones de salida del dispositivo representado en la figura 4 para interrumpir el impulso de erosión;

la figura 6 un desarrollo en el tiempo de la tensión de los impulsos de erosión, en los que la duración del impulso depende de la duración de la descarga y el retraso del tiempo de disparo, según otro ejemplo de realización de la presente invención;

la figura 7 un desarrollo en el tiempo de la corriente de un impulso de erosión, en el que se aumenta el valor de la corriente antes de interrumpir el impulso de erosión, según otro ejemplo de realización de la presente invención;

la figura 8 un desarrollo en el tiempo de la corriente de un impulso de erosión, en el que el dispositivo para interrumpir el impulso de erosión no está sincronizado con el control de la corriente integrado en el generador de descargas eléctricas, según el estado de la técnica; y

la figura 9 un desarrollo en el tiempo de la corriente de un impulso de erosión, en el que el dispositivo para interrumpir el impulso de erosión está sincronizado con el control de la corriente integrado en el generador de descargas eléctricas, según otro ejemplo de realización de la presente invención.

A continuación, ante todo, para entender mejor la invención y los términos técnicos utilizados para su descripción se describe el principio general del mecanizado electroerosivo mediante las figuras 1 y 2, que para series de impulsos de erosión según el estado de la técnica muestran el desarrollo en el tiempo de la tensión U_{FS} y de la corriente I_{FS} correspondiente.

El mecanizado electroerosivo de piezas de trabajo se basa en el arranque de materiales eléctricamente conductores, que se produce mediante operaciones de descarga eléctrica entre dos electrodos (electrodo-herramienta y pieza de trabajo) en un medio de trabajo (líquido dieléctrico). El arranque se origina por descargas (chispas) separadas espacial y temporalmente entre sí, no estacionarias. Para ello, la pieza de trabajo y el electrodo-herramienta se colocan en la posición de trabajo de modo que entre ambos quede un intersticio de trabajo. Si ahora se aplica una tensión eléctrica a los electrodos (en forma de una serie de impulsos de erosión), entonces tras superar la resistencia a descargas disruptivas del medio de trabajo, determinada por la distancia entre electrodos y la conductibilidad eléctrica del líquido dieléctrico, se produce la formación de tramo de descarga de elevada energía. Los generadores de descargas eléctricas adecuados proporcionan la energía necesaria para generar los impulsos de erosión. En el estado de la técnica se utilizan a este respecto sobre todo generadores de impulsos estáticos.

Durante una descarga las operaciones físicas, que llevan al arranque de material, se dividen en tres fases principales sucesivas, la fase de formación, de descarga y de reducción. En la descripción a continuación de estas tres fases diferentes se supone que al electrodo-herramienta se aplican impulsos de erosión con tensión positiva y por tanto, éste asume la función del ánodo. Evidentemente, la presente invención también encuentra aplicación para otros procesos de erosión, en los que por ejemplo al electrodo-herramienta se le proporcionan impulsos de erosión negativos.

Durante la fase de formación se forma el canal de descarga entre los dos electrodos. Para ello el generador de descargas eléctricas aplica un impulso de erosión con un valor de tensión ajustado a los electrodos, la denominada tensión en vacío U_i , que en el tramo de descarga aparece como valor máximo, cuando todavía no fluye ninguna corriente I_{FS} a través del canal de descarga. La tensión en vacío U_i ajustada determina entre otras cosas el ancho del intersticio al que puede dispararse la descarga. Transcurrido el denominado tiempo de retraso de disparo tras aplicar el impulso

de erosión fluye una corriente I_e casi exclusivamente sobre la superficie lateral del canal de descarga, y el ánodo se evapora parcialmente por bombardeo electrónico. En este punto se produce fundamentalmente el desgaste del electrodo-herramienta. El electrodo-herramienta que actúa como ánodo absorbe concretamente energía de los electrones negativos acelerados en el campo eléctrico del tramo de descarga. Éstos tienen una masa reducida en comparación y por tanto se aceleran en un intervalo de tiempo relativamente corto.

En la fase de descarga la energía eléctrica suministrada por el generador de descargas eléctricas provoca una fusión o evaporación de material fundamentalmente en la pieza de trabajo. La fase de descarga se caracteriza por una tensión de descarga dependiente del tiempo, que aparece en el tramo de descarga cuando se ha disparado la descarga y fluye la corriente correspondiente de descarga I_e . Con frecuencia se define una tensión de descarga U_e media que depende del par de materiales utilizado y que en la mayor parte de los casos de aplicación se encuentra entre 15 y 30 V. La corriente de descarga I_e puede ajustarse en el generador a un valor preestablecido. Con frecuencia una tensión de trabajo se define también como el valor medio aritmético de la tensión existente durante el mecanizado en el tramo de descarga y una corriente de trabajo, como el valor medio aritmético de la corriente de descarga I_e que fluye durante el mecanizado a través del tramo de descarga. La tensión de trabajo y la corriente de trabajo son dos magnitudes de medición a las que se recurre para ajustar y supervisar el proceso de erosión. La energía de descarga es la energía transformada en el tramo de descarga durante una descarga. A través de la misma se determina el volumen de cada una de las descargas y además también fundamentalmente la configuración de la superficie erosionada.

La fase de reducción se inicia con la desconexión de la corriente de descarga I_e . El canal de plasma se colapsa y se eyecta el material en parte evaporado, en parte líquido. Por ello, en un mecanizado con polaridad positiva el arranque de material tiene lugar fundamentalmente durante la fase de reducción.

Para un buen proceso de erosión deben crearse además en el intersticio de trabajo condiciones de descarga, que en la medida de lo posible excluyan la aparición de cortocircuitos, descargas erróneas e impulsos en vacío. Para detalles adicionales respecto al mecanizado electroerosivo se remite a Wilfried König-Fritz Klocke "Fertigungsverfahren, Abtragen und Generieren", Springer Verlag, ISBN 3-540-63201-8.

Ahora la invención se describirá con más detalle con referencia a la figura 3, en la figura 3a se muestra el desarrollo en el tiempo de la tensión U_{FS} de un impulso de erosión, la figura 3b, el desarrollo correspondiente de la derivada en el tiempo $-dU_{FS}/dt$ del desarrollo de la tensión mostrado en la figura 3a para la duración de la fase de descarga (tras la caída de la tensión en vacío U_i hasta la tensión de descarga U_e) y la figura 3c, el desarrollo en el tiempo de la corriente I_{FS} correspondiente que fluye al electrodo-herramienta.

Se conoce que el cráter de descarga originado por el plasma de descarga en el ánodo y en el cátodo aumenta al prolongar la duración de descarga t_e . Incluso, tras un cierto tiempo, en el cátodo el punto de base de plasma empieza a desplazarse sobre la superficie del cátodo, y origina cráteres secundarios menores (véase Arnd Karden, "Funkenerosive Senkbearbeitung mit leistungssteigernden Elektrodenwerkstoffen und Arbeitsmedien", Band 2/2001, Shaker Verlag, ISBN 3-8265-8392-2). La rugosidad de la superficie de material mecanizada corresponde al radio del punto de base de chispa (Daryl di Bitonto *et al.* "Theoretical models of the electrical discharge machining process", "I. A. simple cathode erosion model" y "II. The anode erosion model", Journal of Applied Physics, Vol. 66, 1989, No. 9, págs. 4095-4111).

Debido al aumento del diámetro del punto de base de chispa al prolongar la duración de descarga t_e se reduce la densidad de corriente en el canal de plasma, y por tanto, la tensión de descarga entre el electrodo-herramienta y la pieza de trabajo (véase Matthias Timm, "Elektronische Stromquelle für das funkenerosive Schneiden von elektrisch schlecht leitfähigen Werkstoffen", Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1996, Dissertation, páginas 30 y ss.).

Los inventores han descubierto que a partir de la tensión de descarga U_e puede derivarse en qué instante ya no se amplía el diámetro del punto de base de chispa, ya que se consigue un equilibrio térmico entre la energía suministrada y la energía térmica emitida por la semiesfera fundida a la pieza de trabajo. Además también han descubierto, que el impulso de descarga no tiene que perdurar más tiempo, ya que la rugosidad deseada se ha conseguido a partir de este instante. Este instante se consigue precisamente cuando existe un comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_e . En el caso de una corriente de descarga I_e que se mantiene constante, el comportamiento asintótico es una tensión de descarga U_e que discurre fundamentalmente de manera constante en el tiempo. En determinados casos puede ser más sencillo determinar el comportamiento asintótico a partir de otra magnitud derivada a partir de la tensión de descarga U_e .

Esta magnitud derivada puede ser por ejemplo la potencia de descarga que puede determinarse a partir del producto de la tensión de descarga U_e registrada por unidad de tiempo y de la corriente de descarga I_e que fluye por unidad de tiempo. También puede ser una magnitud que se derive por la división de la tensión de descarga U_e registrada por unidad de tiempo por la corriente de descarga I_e que fluye por unidad de tiempo. En conjunto, por el término utilizado en este caso de "comportamiento asintótico" se entiende el comportamiento que adopta la tensión de descarga U_e (o la magnitud derivada, tal como la potencia de descarga) en equilibrio, en el que el diámetro del cráter con la corriente de descarga I_e que fluye en ese momento ha adoptado fundamentalmente un máximo. A cada corriente de descarga I_e corresponde precisamente un diámetro de cráter máximo y así también una tensión de descarga U_e correspondiente, que dado el caso se ajusta sólo con retraso.

En las figuras 3a-c mediante la línea vertical de puntos y rayas se indica el instante en el que existe un comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_e . Para una corriente de descarga I_e constante, este comportamiento asintótico, tal como se indicó anteriormente, es una tensión de descarga U_e constante en el tiempo. Esta constancia en el tiempo puede determinarse por ejemplo por la derivada $-dU_{FS}/dt$ en el tiempo de la tensión del intersticio U_{FS} (o de la tensión de descarga U_e), que en el comportamiento asintótico es fundamentalmente igual a cero (o menor que un valor umbral preestablecido). Inmediatamente antes del instante en el que la derivada en el tiempo es menor que un valor umbral preestablecido, en la figura 3 aún se indica además otro instante como línea vertical continua, a partir del cual la derivada $-dU_{FS}/dt$ en el tiempo de la tensión de descarga U_e cae considerablemente (también puede recurrirse a este instante para determinar el haber alcanzado el comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_e).

Para un par de cobre/acero (electrodo-herramienta/pieza de trabajo), el valor asintótico de la tensión de descarga U_e se encuentra por ejemplo en aproximadamente 24 V. Sin embargo, este valor no es igual para todos los impulsos de descarga y pares de electrodo-herramienta/pieza de trabajo, ya que la caída de tensión a través del intersticio de erosión depende por ejemplo de la corriente de descarga I_e y de la geometría del electrodo. Además, una propiedad conocida del proceso de erosión es su carácter en su mayor parte estocástico, que está condicionado por las relaciones físicas que varían continuamente en el intersticio de trabajo.

La duración de tiempo requerida por el impulso de descarga para alcanzar este estado no es constante, ya que la velocidad, con la que una descarga alcanza un diámetro de punto de base de plasma determinado, depende de la situación macroscópica en el intersticio y de la geometría local en la zona del tramo de descarga. Si por ejemplo de la descarga de chispas anterior queda material fundido localmente de manera momentánea y la nueva descarga se realiza en la proximidad de la descarga anterior, entonces ha de utilizarse menos energía y tiempo para conseguir el diámetro deseado.

Preferiblemente, el proceso de erosión se optimiza aprovechando los conocimientos anteriores tal como sigue. Ante todo, con ayuda de mediciones empíricas para valores preestablecidos de la corriente de descarga I_e (que preferiblemente se mantiene constante) se determina la rugosidad de superficie correspondiente, que se alcanza en el instante en el que la tensión de descarga U_e se convierte en asintótica. Estos pares de valores de corriente de descarga I_e y rugosidad de superficie se almacenan en el generador de descargas eléctricas como parámetro tecnológico, para que cuando posteriormente quiera alcanzarse una rugosidad de superficie puede determinarse la corriente de descarga I_e correspondiente que ha de ajustarse por el generador de descargas eléctricas.

Durante un mecanizado de piezas de trabajo, para cada etapa de mecanizado se aplican series de impulsos de erosión con una corriente de descarga I_e preestablecida para alcanzar una rugosidad de mecanizado deseada. Entonces, para cada impulso de descarga se permite que la corriente de descarga I_e fluya hasta que se determine un comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_e . En este instante tanto la densidad de corriente como el desgaste del electrodo son mínimos. A continuación o bien se interrumpe el impulso de descarga o bien antes de la interrupción se procede como se explica a continuación (aumento de la corriente de descarga I_e). Preferiblemente, en el caso de estos impulsos de erosión puede aumentarse además la duración de descarga (inicio de la descarga al subir la corriente de descarga I_e hasta alcanzar el comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_e) por un factor de seguridad. En el caso de los impulsos de erosión así obtenidos de duración de descarga adaptativa puede hablarse de series de impulsos isogeométricas, ya que la geometría del cráter es constante.

Tras interrumpir el impulso de erosión el generador de descargas eléctricas introduce un intervalo entre impulsos, que preferiblemente es proporcional a la duración de descarga transcurrida. De manera especialmente preferida, este intervalo entre impulsos es una función de la duración de descarga y del tiempo de retraso de disparo del impulso de erosión anterior. La función puede elegirse de tal modo, que el intervalo entre impulsos sea proporcional a la duración de descarga, cuando el tiempo de retraso de disparo del impulso de erosión anterior es mayor que un valor de umbral inferior, y que sea un valor constante, cuando el tiempo de retraso de disparo caiga por debajo del valor umbral. La figura 6 muestra tres intervalos entre impulsos 20, 21, 22 cuya duración t_0 es proporcional a la duración de descarga t_e anterior. El intervalo 23 mostrado en la figura 6 tiene una duración t_0 , que por ejemplo es aproximadamente igual al intervalo 22 más largo de entre los intervalos 20, 21 y 22. El intervalo 23 se ha elegido por ello mayor que por ejemplo los intervalos 20 y 21, ya que en el caso de un tiempo de retraso de disparo demasiado pequeño con frecuencia el material de la pieza de trabajo tras la evaporación no se ha resolidificado completamente. Esto puede llevar a la metalización de los electrodos, y existe el riesgo de una generación de arco voltaico.

Para el ajuste óptimo de la duración del intervalo puede utilizarse un sistema con lógica difusa (fuzzy logic) o una red neuronal, que además de las magnitudes de entrada mencionadas (tiempo de retraso de disparo, duración de descarga t_e) recurre a magnitudes de entrada adicionales (por ejemplo conductibilidad del intersticio, frecuencia de cortocircuitos, inestabilidad del proceso, tasa de alta frecuencia durante la descarga, etc.) para calcular la duración del intervalo, ya que no existe una correlación sencilla entre las magnitudes de entrada citadas y la duración del intervalo. Para ello se remite a la bibliografía pertinente, por ejemplo a la tesis de Dirk F. Dauw, "Online Identification and Optimisation of Electro-Discharge Machining", Dissertation Katholieke Universiteit Leuven, 1985.

Con las medidas anteriormente mencionadas se garantiza que cada impulso de descarga sólo dure lo necesario, y que se optimice el número de impulsos de erosión por unidad de tiempo y por tanto, el arranque. De manera ventajosa se consigue una mayor tasa de arranque con un desgaste del electrodo-herramienta reducido, en conjunto un mayor arranque de material por impulso de erosión, sin aumentar la rugosidad de superficie y sin empeorar las demás

características del mecanizado que determinan la calidad (por ejemplo desgaste del electrodo, calidad de superficie, dimensión por debajo de lo normal, etc.). Otra ventaja consiste en que el ancho del intersticio permanece proporcionalmente pequeño, y por tanto, los objetivos de calidad requeridos se consiguen antes. Además, de manera ventajosa, se reduce la capa de superficie dañada por la sollicitación térmica durante la descarga.

Las medidas mencionadas pueden utilizarse preferiblemente tanto para el mecanizado de desbaste como también de acabado.

Como medida adicional puede utilizarse un impulso de corriente especial, que inmediatamente antes de finalizar el impulso aumente momentáneamente su amplitud de corriente, de modo que al colapsar el canal de plasma el baño de fusión en el lado del cátodo se eyecte mejor y se intensifique el grado de acción del efecto de erosión. Además, un aumento de corriente al final del impulso de descarga actúa contra una posible resolidificación de la fase fundida en la pieza de trabajo, y se reduce la capa de borde térmicamente dañada. De este modo se reduce la duración total del mecanizado, ya que en el mecanizado de acabado posterior tiene que utilizarse menos tiempo para retirar esta capa de borde. Un impulso de corriente de este tipo se representa esquemáticamente en la figura 7, en el que al alcanzar el comportamiento asintótico de la tensión de descarga se aumenta la corriente de descarga I_c del generador de descargas eléctricas durante una duración de tiempo preestablecida hasta un valor de corriente, que es mayor que la corriente de descarga I_c durante la descarga (es decir, antes de alcanzar el comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_c). La relación de este valor de corriente elevado con respecto a la corriente de descarga "normal" puede ajustarse a este respecto dependiendo del resultado que haya de alcanzarse.

El impulso de corriente de la corriente de descarga presenta además preferiblemente al inicio un flanco de la densidad de corriente que sube lentamente (véase el impulso de corriente en la figura 7), que en la fase de descarga o al final de la fase de formación limita el desgaste del electrodo (véase para ello, por ejemplo el documento US 5.187.341, cuya publicación se incorpora al presente documento como referencia), y hacia el final un flanco que cae con la mayor pendiente posible.

Los generadores de descargas eléctricas modernos, por ejemplo tal como los que se describen en el documento US 5.280.153, están realizados en una técnica sincronizada. Así, un único generador puede proporcionar tanto el flanco de corriente que aumenta lentamente al inicio del impulso de corriente, como también el aumento de corriente al final, sin costes adicionales de hardware, ya que el control para la formación de los impulsos de corriente se implementa preferiblemente en un FPGA (Field Programmable Gate Array).

Ya que con frecuencia la corriente de descarga I_c se regula mediante la conexión y desconexión de transistores, que mantienen la corriente de descarga I_c entre una envolvente preestablecida inferior y una superior, se produce un impulso de corriente con una ondulación de corriente característica, tal como se representa en las figuras 7 a 9. La pendiente de los flancos de ondulación de corriente no se elige normalmente demasiado grande, para mantener la frecuencia de conmutación lo más reducida posible. Tal como ya se mencionó anteriormente, el flanco de corriente que cae debería tener al final del impulso de corriente la mayor pendiente posible, para maximizar el arranque de material y favorecer el efecto de erosión. Por tanto, el generador de descargas eléctricas se configura de tal forma, que el final del impulso se introduce en aquel instante, en el que tal como representa la figura 9 la amplitud de corriente es máxima. De este modo se garantiza, que el flanco discurre con la mayor pendiente posible a lo largo de todo su desarrollo. Esto se aclara mediante una comparación con la figura 8, que muestra un ejemplo contrario sin esta configuración especial del generador de descargas eléctricas. En este caso se elimina el impulso de corriente con una amplitud de corriente reducida. Si se considera todo el flanco de corriente que cae en la figura 9, éste comienza con una parte plana y finaliza sólo tras una duración de tiempo determinada (que corresponde a la mitad de la duración del periodo de la ondulación de corriente) con la parte con pendiente. Este caso desfavorable sólo lleva a un efecto de erosión reducido. Un buen efecto de erosión se requiere sin embargo, para configurar la denominada capa blanca que se produce durante el proceso de erosión sobre la superficie de la pieza de trabajo por la sollicitación térmica menos rígida y quebradiza. En principio, una capa blanca rígida y quebradiza reduce la calidad de las superficies de pieza de trabajo, y por tanto, por ejemplo la vida útil de herramientas de punzón fabricadas con electroerosión.

Las dos medidas de un aumento de corriente y garantía de un flanco de caída con pendiente pueden preverse evidentemente combinadas.

La figura 4 muestra un circuito de base esquemático de un dispositivo para la interrupción adaptativa del impulso de corriente según un ejemplo de realización preferido de la presente invención, que está configurado para registrar el instante en el que la tensión de descarga U_c alcanza su comportamiento asintótico. Este dispositivo está integrado de manera funcional en un generador de descargas eléctricas, tal como se describe por ejemplo en el documento US 5.280.153, cuya publicación se incorpora al presente documento como referencia. Comprende un elemento de debilitamiento 10, que como señal de entrada obtiene la tensión de intersticio U_{FS} (corresponde a la tensión de descarga U_c) registrada habitualmente por el generador de descargas eléctricas y emite esta tensión por ejemplo debilitada por el factor 20. La tensión debilitada se filtra entonces en cada caso por dos filtros paso bajo 11 y 12 conectados en paralelo, siendo la constante de tiempo del filtro paso bajo 12 mayor que la del filtro paso bajo 11.

Las señales de salida de los filtros paso bajo 11 y 12 se limitan durante el tiempo de retraso de disparo a un valor máximo (este valor máximo puede corresponder por ejemplo a una tensión de conmutación de 40 V). Para ello los filtros paso bajo reciben una señal de control adicional como señal de entrada, por ejemplo la señal "descarga"

procedente del generador de descargas eléctricas, que durante el tiempo de retraso de disparo tiene un nivel bajo de manera lógica y durante el tiempo de descarga t_c un nivel alto de manera lógica (es decir, al fluir una corriente de descarga). El flanco que sube de esta señal de control puede retrasarse algo mediante un elemento de retraso, para que por ejemplo corresponda al instante, en el que la corriente de descarga I_c ya tiene un valor diferente de cero (por ejemplo la mitad del valor de la corriente de descarga I_c máxima ajustada o bien el valor máximo). De manera correspondiente, la señal de control también puede ser determinada por el generador de descargas eléctricas directamente a partir de la corriente de descarga I_c , por ejemplo cuando ésta ha alcanzado la mitad de su valor máximo o bien el valor máximo.

Los filtros paso bajo 11 y 12 proporcionan las señales de salida A y B representadas en la figura 5a (la línea superior horizontal representa el valor máximo mencionado anteriormente). La señal A representa la tensión de descarga U_c instantánea, a la que sólo se eliminó el ruido mediante el ajuste correspondiente de la constante de tiempo del filtro paso bajo 11. Mediante el ajuste correspondiente de la constante de tiempo del filtro paso bajo 12 la señal B es una variante de la señal A filtrada con más intensidad, en la que sobre todo las transiciones tienen un desarrollo más suave. Ambas señales A y B se restan en un amplificador operacional 13 que emite una señal C representada en la figura 5b. Su desarrollo durante la fase de descarga corresponde fundamentalmente al gradiente de la ampliación del cráter. Durante el tiempo en vacío, la señal C tiene picos de impulso al alcanzar la tensión en vacío y en la caída de tensión posterior. La señal C se compara entonces en un comparador 15 con un valor umbral ref. proporcionado por una memoria de valores umbral 14. El comparador 15 proporciona una señal de salida D representada en la figura 5c. La señal D se encuentra a un nivel bajo de manera lógica, siempre que la señal C supere el valor umbral ref. y a un nivel alto de manera lógica en el caso contrario (la figura 5c no muestra los niveles altos de manera lógica, que realmente adopta la señal D también durante el tiempo de retraso de disparo; dado el caso, éstos podrían suprimirse ya en el comparador 15, obteniendo éste también la señal de control “descarga” como señal de entrada y manteniendo su salida a un nivel bajo de manera lógica, siempre que la señal de control “descarga” se encuentre a un nivel bajo de manera lógica). La señal D se introduce en un elemento Y 16, que como entrada adicional obtiene la señal de control “descarga” del generador de descargas eléctricas. La señal “descarga” se encuentra, tal como se mencionó, a un nivel alto de manera lógica, siempre que tenga lugar una descarga y fluya una corriente de descarga I_c . El elemento Y 16 proporciona una señal de salida E que con un flanco en aumento de nivel bajo de manera lógica a nivel alto de manera lógica indica que se ha alcanzado el comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_c y que además con un flanco en disminución de nivel alto de manera lógica a nivel bajo de manera lógica indica que se ha finalizado la descarga.

Esta eliminación especial del impulso de corriente puede realizarse de manera muy sencilla en técnica analógica. Evidentemente también puede realizarse en técnica digital codificándose las funciones descritas anteriormente de sus componentes individuales por ejemplo, en un denominado módulo FPGA (Field Programmable Gate Array, por ejemplo de la empresa Xilinx, Inc., 2011 Logic Drive, San Jose, CA 95124). De manera alternativa también son concebibles otras variantes de conmutación para determinar el instante en el que se alcanza el comportamiento asintótico de la tensión de descarga U_c . Por ejemplo, un filtro paso alto ajustado de manera correspondiente y sencillo, al que se suministra la tensión de descarga U_c durante la duración de la descarga como magnitud de entrada, puede proporcionar un valor de salida significativo al alcanzar un desarrollo casi constante en el tiempo de la tensión de descarga U_c .

A la duración total de la descarga, cuyo inicio se indica con un flanco en aumento de la señal de “descarga” y cuyo final se indica con un flanco en aumento de la señal E, puede recurrirse por ejemplo para derivar información adicional (con una duración de descarga corta se erosiona por ejemplo sólo una punta, etc.) sobre el mecanizado erosivo momentáneo y dado el caso, ajustar parámetros de erosión adicionales en función de la duración de descarga determinada.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el mecanizado electroerosivo de una pieza de trabajo por medio de un electrodo-herramienta, en el que:

- se aplica un impulso de erosión al electrodo-herramienta, con una corriente de descarga (I_e) controlada a un valor constante, que fluye al menos durante una etapa de la duración del impulso de erosión en una descarga al electrodo-herramienta,
- durante la duración del impulso de erosión se registra la tensión (U_e) existente en el electrodo-herramienta,

caracterizado porque

- con una corriente de descarga controlada de manera constante después de haber determinado un desarrollo constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada o una magnitud derivada de la misma, tal como la potencia de descarga o la relación de tensión registrada a la corriente que fluye en este caso, a continuación se interrumpe el impulso de erosión.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el desarrollo fundamentalmente constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada se determina como instante, en el que la derivada en el tiempo de la tensión (U_e) registrada cae por debajo de un valor umbral (ref.) preestablecido.

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que se determina el inicio de una descarga y tras interrumpir el impulso de erosión se introduce un intervalo entre impulsos con una primera duración de tiempo (t_0) que depende de una segunda duración de tiempo (t_e) que está definida como tiempo entre el inicio de la descarga y la determinación del desarrollo fundamentalmente constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada en el impulso de erosión anterior.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la primera duración de tiempo (t_0) es proporcional a la segunda duración de tiempo (t_e).

5. Procedimiento según la reivindicación 3 ó 4, en el que la primera duración de tiempo (t_0) depende además de un tiempo de retraso de disparo (t_i), que está definido como tiempo entre la aplicación del impulso de erosión y el inicio de la descarga.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que la primera duración de tiempo (t_0) depende del tiempo de retraso de disparo (t_i) de tal modo que se le asigna un valor mínimo, siempre que el tiempo de retraso de disparo (t_i) caiga por debajo de un segundo valor umbral.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la corriente de descarga (I_e), que fluye durante la duración de un impulso de erosión en una descarga al electrodo-herramienta, se controla de tal modo que durante una tercera duración de tiempo, que comienza tras determinar el desarrollo fundamentalmente constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada y finaliza con la interrupción del impulso de erosión, se eleva a un valor de corriente preestablecido.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la corriente de descarga (I_e), que fluye durante la duración de un impulso de erosión en una descarga al electrodo-herramienta, se controla por medio de una envolvente preestablecida inferior y superior, de modo que sube y baja entre estas dos envolventes, interrumpiéndose el impulso de erosión en un instante en el que el valor de corriente de la corriente de descarga (I_e) es máximo.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 2 a 8, en el que se ajustan parámetros de erosión adicionales en función de la segunda duración de tiempo (t_e), que está definida como tiempo entre el inicio de la descarga y la determinación del desarrollo fundamentalmente constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada en el impulso de erosión anterior.

10. Dispositivo para el mecanizado electroerosivo de una pieza de trabajo con un generador de descargas eléctricas para generar los impulsos de erosión que han de aplicarse al electrodo-herramienta, que está diseñado de tal modo que durante la duración de un impulso de erosión aplicado al electrodo-herramienta controla la corriente de descarga (I_e), que fluye al menos durante una etapa de la duración del impulso de erosión en una descarga al electrodo-herramienta, a un valor constante y registra la tensión (U_e) existente en el electrodo-herramienta, **caracterizado** por un dispositivo (10-16) unido con el generador de descargas eléctricas, que está diseñado de tal modo, que hace que el generador de descargas eléctricas, con una corriente de descarga controlada de manera constante después de haber determinado un desarrollo fundamentalmente constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada o una magnitud derivada de la misma, tal como la potencia de descarga o la relación de tensión registrada a corriente que fluye en este caso, a continuación interrumpa el impulso de erosión.

11. Dispositivo según la reivindicación 10, en el que el generador de descargas eléctricas está diseñado de tal modo que determina el inicio de una descarga y tras un impulso de erosión interrumpido introduce un intervalo entre

ES 2 315 440 T3

impulsos con una primera duración de tiempo (t_0), que depende de una segunda duración de tiempo (t_i), que está definida como tiempo entre el inicio de la descarga y la determinación del desarrollo fundamentalmente constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada en el impulso de erosión anterior.

5 12. Dispositivo según la reivindicación 10 u 11, en el que el generador de descargas eléctricas está diseñado de tal modo que controla la corriente de descarga (I_e), que fluye durante la duración de un impulso de erosión en una descarga al electrodo-herramienta de tal modo que durante una tercera duración de tiempo, que comienza tras determinar el desarrollo fundamentalmente constante en el tiempo de la tensión (U_e) registrada y finaliza con la interrupción del impulso de erosión, se eleva a un valor de corriente preestablecido.

10 13. Dispositivo según una de las reivindicaciones 10 a 12, en el que el generador de descargas eléctricas está diseñado de tal modo que controla la corriente de descarga (I_e) que fluye durante la duración de un impulso de erosión en una descarga al electrodo-herramienta, mediante una envolvente preestablecida inferior y una superior, de modo que la corriente de descarga (I_e) sube y baja entre estas envolventes, y que interrumpe el impulso de erosión en un
15 instante en el que el valor de corriente de la corriente de descarga (I_e) es máximo.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

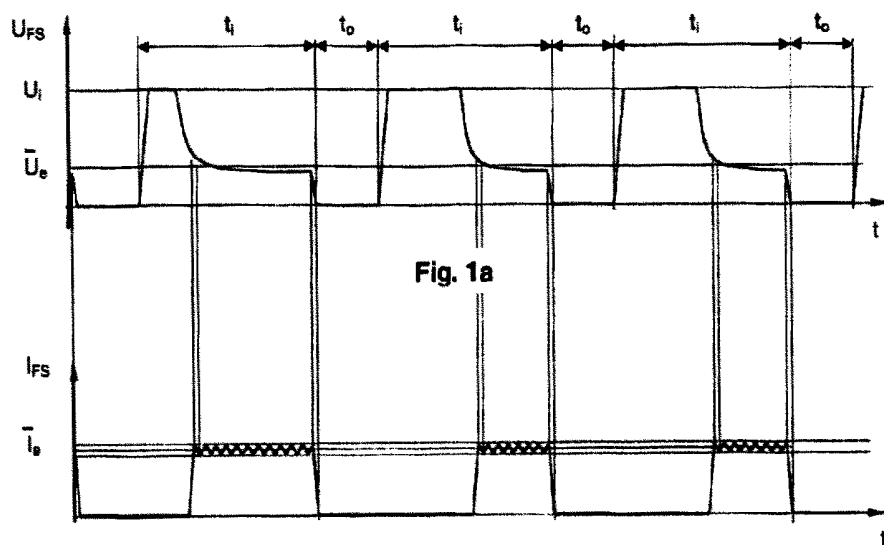


Fig. 1b

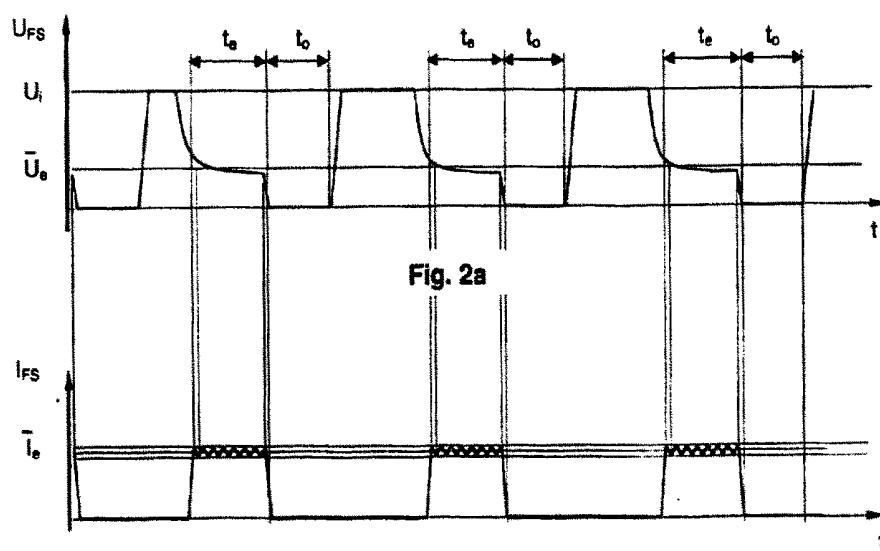
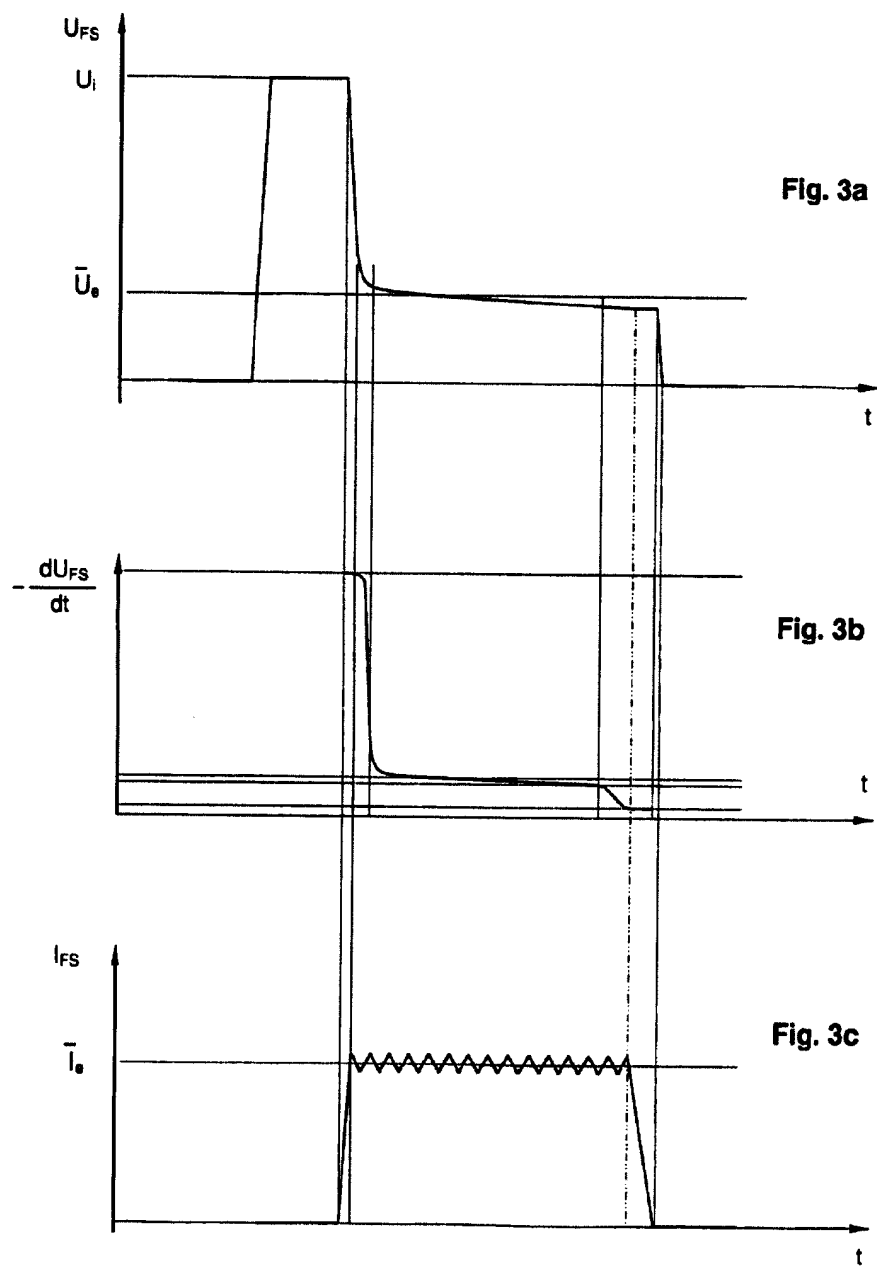


Fig. 2b



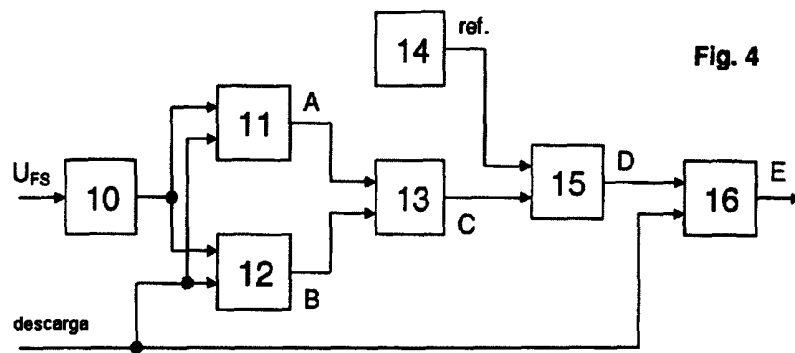


Fig. 4

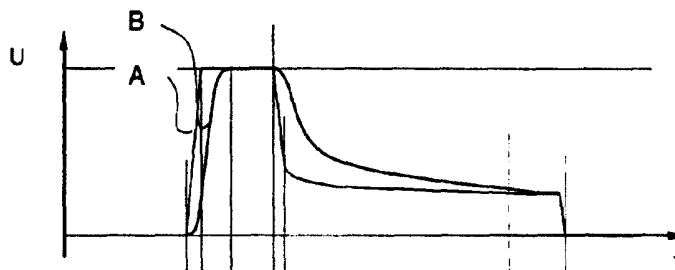


Fig. 5a

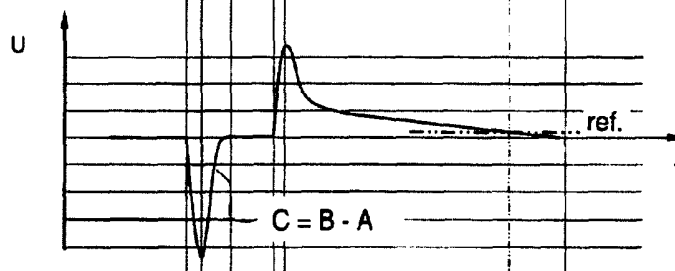


Fig. 5b

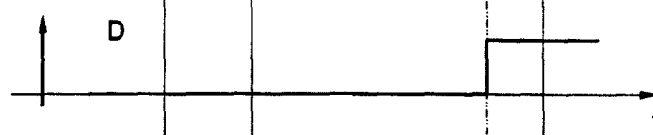


Fig. 5c

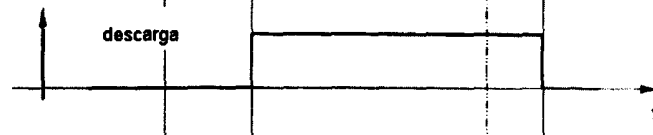


Fig. 5d

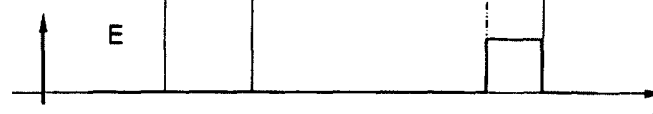


Fig. 5e

