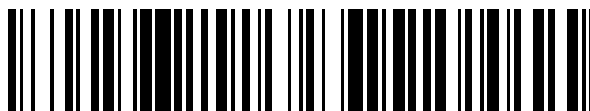


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 470 690**

51 Int. Cl.:

**B23H 1/08**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.01.2008 E 10167112 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.03.2014 EP 2269756**

54 Título: **Dispositivos diseñados para tratar defectos de la capa blanca residual dejada por el proceso de mecanización por medio de descargas eléctricas**

30 Prioridad:

**16.01.2007 EP 07100568**

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

**24.06.2014**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**PEREZ PINAYA, ROBERTO;  
CUSANELLI, GIUSEPPE y  
ROLAND, MARTIN**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 470 690 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

Dispositivos diseñados para tratar defectos de la capa blanca residual dejada por el proceso de mecanización por medio de descargas eléctricas.

5 La presencia frecuentemente perjudicial de una capa blanca y una capa térmicamente afectada ha sido observada en la superficie de piezas mecanizadas mediante mecanización por descargas eléctricas desde que este método fue utilizado por primera vez. La primera está en particular saturada con carbono por la ruptura o craqueo de moléculas de hidrocarburo que constituyen el dieléctrico. La capa térmicamente afectada se hace más profunda a medida resulta nuevamente solidificada la proporción de metal previamente vaporizada o licuada por la descarga, a medida que la energía de descarga es mayor, y también a medida que el metal de la pieza mecanizada disipa calor con mayor dificultad.

10 A causa de esto, los aceros mecanizados por descargas eléctricas sufren excesivo endurecimiento de sus superficies. Aparecen allí tensiones que causan fisuras, grietas y cavidades que son como tales el punto de inicio de roturas que probablemente debilitan las herramientas producidas por el método.

15 La perturbación que afecta la superficie mecanizada es producida de este modo durante la nueva solidificación o resolidificación sobre la superficie de parte del material que ha sido vaporizado o fundido por medio de chispas. Ello está vinculado directamente a la manera en que se utiliza el generador, particularmente la potencia empleada, así como las secuencias para controlar los impulsos de voltaje y corriente.

20 En el caso de piezas de acero, el proceso de fusión y contacto con el dieléctrico basado en hidrocarburo modifica la composición del metal y favorece la formación de carburos de hierro quebradizos. Por otra parte, el ciclo de fusión y resolidificación produce fases austenítica y martensítica metaestables. Estas últimas fases son particularmente quebradizas e incorporan elevadas tensiones residuales causadas por un efecto de expansión de su estructura cristalina durante su formación. Finalmente, como la superficie mecanizada después del acabado está formada principalmente de carburos de hierro y austenita con elevados esfuerzos residuales de tracción, es posible que cualquier tensión adicional derivada de la expansión martensítica inicie una grieta en la interfaz con la zona térmicamente afectada (no fundida por chispas) que se propagará fácilmente sobre la superficie a través de estas fases de carburo de hierro y austenítica.

25 Se recomienda usualmente multiplicar las etapas de acabado con el fin de reducir los defectos superficiales; en otras palabras, proporcionar una graduación de regímenes que sea tan fina como sea posible. Operaciones de pulido también hacen posible eliminar las capas blancas y térmicamente afectadas que deja el último régimen de acabado. Es también usual aplicar varios tratamientos por calor a las superficies pulidas con el fin de estabilizarlas. Estas operaciones requieren muchas acciones mecánicas y resultan muy costosas.

30 El objeto de la presente invención es tratar defectos producidos durante operaciones de semi-acabado mediante mecanización por descargas eléctricas, así como evitar la formación de tales defectos durante las operaciones de acabado finales. Este resultado se obtiene mediante una modificación de la superficie con la ayuda de descargas de manera que se produzca una estructura amorfa distribuida de una manera regular en toda la superficie de la pieza que se ha de tratar.

35 El carácter amorfo se refiere a la disposición espacial de átomos en el material. Aunque el estado cristalino está definido por un patrón periódico de escala atómica o molecular en tres direcciones en el espacio, la estructura amorfa está caracterizada, por otra parte, como en el vidrio, por una agrupación aleatoria de moléculas o átomos dispuestos sin ninguna regla aparente. Este carácter amorfo de superficies creadas de este modo determina las sorprendentes propiedades mecánicas vinculadas a su isotropía excepcional, como se indicará más adelante.

#### Exposición de la técnica anterior conocida

Se conocen dispositivos de modificación de superficies que han sido desarrollados con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas y reducir la densidad de grietas.

45 Respecto a la patente US 5.980.681, de Sremroth, esta trata de un dispositivo que está previsto para producir superficies rugosas o superficies limpias antes de la adherencia a otras superficies, en el que las descargas son producidas entre el electrodo y una pieza de trabajo y en el que la duración de la descarga y la frecuencia de descargas están controladas con el fin de hacer óptimas las propiedades superficiales para aplicaciones de adherencia.

50 Los mismo se aplica para la patente US 6.501.232, de Goto et al, cuyo documento describe en combinación las características del preámbulo de la reivindicación 1. En esta patente se reivindica un dispositivo que tiene medios de control para establecer un periodo de impulso n-ésimo dado dentro de cada descarga en un tiempo correspondiente a la condición de fusión predeterminada de la cubierta dura. La patente reivindica un dispositivo que produce una modificación de la superficie. El dispositivo utiliza un sistema de control basado en experimentos con el fin de hacer óptimo el proceso.

En la patente US 3.035.149, de Matulaitis et al, se reivindica un aparato de descargas eléctricas en el que se producen condiciones transitorias de formación de arco y en el que se proporcionan medios de control y detección con el fin de responder a características del arco y en particular a la formación del arco de CC por medio del movimiento del electrodo con respecto a la pieza de trabajo. El aparato proporciona, por lo tanto, medios para la detección y control externos de las propiedades de la descarga y reacciona de manera correspondiente.

### Sumario de la invención

La presente invención se refiere a un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1 para modificar una superficie con la finalidad de evitar los inconvenientes de las soluciones conocidas señaladas anteriormente, en particular de solucionar los problemas de la cantidad apropiada de aleación amorfa formada como una sustitución para la capa blanca y su homogeneidad. El dispositivo mejora la calidad de aleaciones tratadas por un considerable aumento en efectos macroscópicos de resistencia al desgaste y a la corrosión. En virtud de la estructura amorfa creada en su superficie, las herramientas comúnmente producidas con el dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1 adquieren una dureza y una tenacidad que hacen posible que resistan esfuerzos violentos a los cuales son sometidas. El método amplía las posibles variantes de aleaciones amorfas adaptadas a diversas aplicaciones.

En una realización preferida, la invención propone el uso de un dieléctrico líquido con el dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1, basado preferiblemente en aceites de hidrocarburos corrientemente utilizados en la mecanización por descargas eléctricas, que contienen una suspensión de polvos que consiste en una elección particular de metales, óxidos, carburos, nitruros, boruros o tierras raras que determinan la aparición de la estructura amorfa.

En esta realización, se usa un segundo tipo de polvo con la finalidad de garantizar la homogeneidad del tratamiento de la superficie. Este consiste en polvos micrométricos de grafito, carbono o aluminio en varias formas, que se pueden mezclar también en el líquido dieléctrico o pueden cubrir el electrodo o la pieza en la forma de una fina capa uniforme.

Para que las partículas del segundo tipo produzcan su efecto de homogeneización, es necesario que su tamaño medio esté en relación con el espacio de separación y su distribución de tamaños sea deferente de la distribución de tamaños de las partículas nanométricas.

La energía de las descargas durante los regímenes de acabado finales se ha de ajustar en relación con el tamaño medio de las nano-partículas. Además, los parámetros eléctricos se eligen de manera que, por una parte, minimicen la eliminación de material y, por otra parte, refuercen el efecto producido por los polvos micrométricos que se opone al fenómeno de la localización de descargas. Estos dos efectos se obtienen preferiblemente creando condiciones que faciliten la extinción espontánea del plasma de mecanización por descargas eléctricas. De manera más precisa, tales condiciones se obtienen ajustando los diversos niveles del impulso de corriente en proporción al valor de corriente de extinción típico de materiales de electrodo y empleando una secuencia particular para controlar los impulsos de voltaje/corriente.

Para una energía de descarga fija, la cantidad de aleación puede, en particular, ser aumentada usando impulsos de corriente durante la etapa de acabado, la función de decaimiento de los cuales viene dada por una pendiente ajustable menor que un cierto límite, preferiblemente con polaridad negativa.

El presente dispositivo del invento puede ser utilizado en relación con un generador para mecanización por descargas eléctricas que comprende al menos una fuente de voltaje/corriente conectada al espacio de separación de mecanización por medio de un circuito eléctrico adaptado de manera que la oscilación transitoria no pueda realizar la extinción del plasma de mecanización por descargas eléctricas. Dicho generador está dispuesto de manera que genera impulsos eléctricos entre un electrodo de herramienta y un electrodo de pieza que constituyen los polos de un espacio de separación de mecanización y con el fin de establecer allí el encendido de descargas eléctricas. Aquel está caracterizado porque sus parámetros están ajustados de manera que se minimiza la eliminación de material y se facilita la extinción espontánea del plasma de mecanización por descargas eléctricas.

El dispositivo hace posible conseguir una capa blanca con una superficie amorfa exenta de defectos tales como grietas o cavidades, y que posee propiedades mecánicas notables de dureza y de resistencia al desgaste. Además, la capa blanca convertida está distribuida uniformemente en toda la superficie a tratar, con rugosidad muy pequeña para tiempos de mecanización menores que los de la mecanización normal. El resultado puede ser obtenido con ayuda de electrodos conformados, hechos comúnmente de cobre, usados durante las fases de mecanización en basto y de semi-acabado y por lo tanto sin necesidad de producir electrodos especiales que contengan el elemento que constituye la aleación amorfa.

Otras ventajas se desprenderán de las características expresadas en las reivindicaciones dependientes y de la descripción que explica la invención con más detalle con ayuda de las figuras, que muestran cómo se obtienen los resultados metalúrgicos, o diagramas que representan ejemplos de las realizaciones preferidas.

### Presentación de las figuras

Figura 1: micrografía de electrones de transmisión de una capa a través de la estructura superficial de una pieza de acero mecanizada por el método normal de mecanización por descarga eléctrica.

5 Figuras 2a, 2b, 2c, 2d, 2e: varios aspectos de una micrografía de electrones de transmisión de una capa a través de la estructura superficial de una pieza de acero mecanizada mediante el método de acuerdo con la invención con la ayuda de una suspensión de nano-polvos de TiN, con un diámetro medio de 60 nm.

Figura 3: micrografía de electrones de dispersión de retorno de una capa blanca que ilustra el fenómeno de detención de la propagación de una grieta por la capa amorfa gracias a la invención.

Figura 4: representación esquemática de la secuencia de tiempos de señales de voltaje/corriente proporcionadas por un dispositivo de mecanización por descargas eléctricas de acuerdo con la invención.

10 Figura 5: ejemplo de un diagrama para controlar la velocidad de extinción espontánea hasta un valor de referencia TXref.

Figura 6: representación esquemática de un dispositivo que hace posible ejecutar la invención.

### Descripción detallada de la invención

15 La estructura de la capa blanca producida con la mecanización por descargas eléctricas depende fuertemente de los elementos presentes en el fragmento de metal fundido que viene de la pieza en contacto con el plasma de la descarga. En el caso de mecanización normal sobre acero sin el uso de aditivos, se pueden observar en la figura 1 fases metaestables tales como austenita y martensita y carburos de hierro en la capa resolidificada delimitadas por líneas de trazos discontinuos. Han sido identificadas varias estructuras cristalinas a partir de mediciones de espectros de difracción de electrones realizadas en las diversas capas observadas y que han sido insertadas en la parte inferior derecha de la imagen: el índice "a" indica la situación de carburos de hierro, el "b" austenita residual, el "c" martensita y el "d" ferrita o material de base. En la superficie se observa una capa amorfa "e" extremadamente fina.

25 Estas fases indican que el acero ha sido radicalmente transformado por el rápido proceso de resolidificación que ha ocurrido después de la extinción del plasma y durante el cual los átomos de carbono que proceden de la descomposición del dieléctrico han resultado introducidos en la nueva estructura. Se han encontrado fases ricas en carbono (carburos) situadas de manera natural en la superficie de la capa blanca. En lo que sigue la composición es denominada como austenita, que es una fase metaestable producida entre 700 y 900°C. A temperaturas más bajas, durante la termalización, parte de este componente austenítico es transformado en martensita. La estructura de la capa blanca es principalmente cristalina.

30 La estructura cristalina observada es debida al contexto muy particular y a la cinética de resolidificación de la capa blanca, que en realidad se forma a partir del material de base y que progresa hacia la superficie. Este fenómeno se ha de atribuir a la excelente transferencia de calor por conducción en la interfaz entre la capa blanca y el metal de la pieza, como oposición a la escasa transferencia de calor por convección en la interfaz entre la capa blanca y el medio entre electrodos, que contiene vapores de hidrocarburo y el plasma durante la extinción.

35 Estas dinámicas asignan lugares de nucleación en la interfaz entre la aleación en el estado líquido y sólido. Puesto que el material de base tiene una estructura cristalina, las diversas fases de la capa blanca tendrán también la tendencia a estar hechas de una estructura del mismo tipo y ello, sorprendentemente, a pesar de las muy elevadas velocidades de solidificación.

40 La estructura obtenida en la superficie de aceros presenta por lo tanto diferentes características que cambian de acuerdo con la distancia a la superficie, en la capa blanca y después en la zona afectada térmicamente. Estas diferencias en estructuras conectadas conducen a elevados esfuerzos de tracción en la superficie de la pieza, los cuales, asociados con las propiedades de baja ductilidad y baja tenacidad de la fase presente, causan agrietamiento y hacen esta capa quebradiza.

45 El dispositivo del invento, que puede suministrar cantidades relativamente grandes de elementos activos en la forma de nano-polvos en el mismo lugar en que se produce la fusión del fragmento de metal que se ha de tratar, provoca la aparición de aleaciones amorfas en el superficie, mientras que otros métodos que utilizan suspensiones conducen a la formación de nuevas aleaciones cristalinas.

50 La figura 2A muestra un micrografía de escaneo de electrones de transmisión (STEM) de la sección de una capa blanca obtenida por el método para modificar la superficie en una suspensión de nano-polvos de TiN con un diámetro medio de 60 nm. En esta figura, se identifica una estructura amorfa "a" en la superficie de la muestra, caracterizada porque su espectro de difracción, insertado en la parte inferior derecha de la figura 2A, no produce una red de puntos de difracción como la que es producida por ejemplo mediante las diversas fases cristalinas del acero identificadas en la figura 1. Por otra parte, por debajo de esta capa amorfa se puede distinguir una estructura cristalina "b" sobre la capa blanca y, en el nivel más bajo, otra estructura cristalina "c" correspondiente al material de base. El escaneo de la misma sección por microsonda de electrones hace posible identificar la distribución de los

elementos presentes en esta capa blanca. Las figuras 2C, 2D y 2E muestran los resultados de estos análisis para los elementos Ti, Cr y Fe, respectivamente. La cantidad de cada elemento es proporcional a la intensidad luminosa sobre las micrografías. La figura 2B reproduce aproximadamente las zonas amorfa y cristalina identificadas en la figura 2A de manera que sitúan los elementos en una estructura dada. De este modo se observa que para la parte amorfa "a" el mayor componente identificado en la figura 2C es titanio. Por otra parte, el cromo del acero de base está ausente en las zonas "a" y "b" que definen la capa blanca, pero está presente en la zona "c". El hierro está presente en toda la sección, pero en una cantidad menor en la capa blanca debido al fenómeno de formación de aleación con nano-polvos y carbono del dieléctrico.

Puesto que la modificación deseada de la superficie ha de hacerse sobre volúmenes de metal en fusión que tienen escalas dimensionales del orden de un micrómetro, esto hace esencial utilizar polvos con un tamaño nanométrico en la suspensión dieléctrica que utiliza el dispositivo del invento de acuerdo con la reivindicación 1. Partículas con un diámetro mayor no podrán ser incorporadas en la aleación por razones de la velocidad del proceso.

Aunque se sabe que el efecto de algunos elementos impide la cristalización de aleaciones de hierro bajo condiciones de resolidificación no extremas, las mismas condiciones muestran ser insuficientes en la mecanización por descarga eléctrica para producir depósitos amorfos homogéneos.

El tamaño y la concentración de los elementos que formarán la aleación amorfa son condiciones esenciales. En consecuencia, son necesarias partículas con un tamaño medio de entre 1 nm y 1 micrómetro, preferiblemente de entre 1 nm y 300 nm en una concentración en volumen equivalente a un valor entre 0,1 y 50 g/l de carbono, preferiblemente entre 1 y 10 g/l en volumen de carbono equivalente.

La obtención de la aleación amorfa requiere la disrupción y desorganización de la estructura cristalina que el hierro y el carbono tienen la tendencia a construir de manera natural con el fin de formar carburo de hierro. A este fin, la dimensión atómica de elementos activos de nano-polvos debe ser suficientemente diferente de la del hierro para que no sea substituida por ella.

La diferencia entre los radios atómicos de los elementos que se han de alea ha de ser mayor que 12% y sus entalpías de reacción deben ser negativas o exotérmicas. Estas condiciones son mencionadas, por ejemplo, por Inoue [Mater. Trans. JIM 36, 806 (1995)].

En consecuencia, la invención recomienda el uso con el dispositivo del invento de al menos un polvo de tamaño nanométrico que pertenezca al grupo W, C, Mo, Ni, Cr, Ti, Ge, TiC, TiN, Nb, Ta, Al, Zr, B o al grupo de las tierras raras, tal como Y u óxidos tales como  $Y_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  o  $ZrO_2$ . Los dieléctricos basados en hidrocarburos tienen la función de proporcionar carbono a la aleación superficial. Los dieléctricos acuosos requieren la aportación suplementaria de polvos de grafito, carbono, boro o itrio, o de un compuesto que contenga carbono. Por razones de mayor facilidad de producción, se pueden usar también nano-polvos de  $B_4C$  y  $TiB_2$  en lugar de polvos puros de boro y titanio con el dispositivo de la reivindicación 1. Adiciones de nano-polvos de cromo y níquel pueden reforzar la resistencia a la corrosión de aleaciones amorfas. El uso de varios elementos en una suspensión favorecerá más la formación de vidrios metálicos.

Durante el proceso de acabado mediante mecanización por descargas eléctricas, la aleación entre los materiales de las suspensiones, carbono del dieléctrico y elementos del acero tiene poco tiempo para formarse, ya que estos procedimientos de mecanización usan descargas que duran un máximo de unos pocos microsegundos. El proceso de difusión del carbono y otros elementos en el hierro ocurre por medio del fenómeno de convección en los metales fundidos, el cual ocurre principalmente durante el periodo de descarga, pero que se extiende durante unos pocos microsegundos más después de la extinción. Por lo tanto son necesarias largas descargas para proporcionar el líquido, el cual formará la capa blanca, el tiempo suficiente para que la mezcla resulte homogeneizada, de manera que integre una elevada concentración de elementos capaces de favorecer la formación del carácter amorfo. La consecuencia es que el uso de descargas con extinción espontánea que permitan ventajosamente que se extienda la duración del plasma hasta los límites posibles del método de mecanización por descargas eléctricas.

Un fenómeno que es usualmente deseado resulta paradójicamente dañino en el caso particular de la invención. Consiste en la implosión del plasma que ocurre durante extinciones de la descarga y que hace usualmente que sea eliminado el material. De hecho es preferible minimizar la dispersión de la mezcla fundida en el líquido dieléctrico mediante el efecto de implosión y, por otra parte, favorecer su migración hacia la superficie de la pieza que se ha de tratar.

Esto es por lo que la invención recomienda medios que hagan posible minimizar la eliminación de material o el desgaste de uno u otro de los electrodos, y favorecer el retorno del metal fundido hacia la pieza que se ha de tratar.

La estimulación espontánea de extinciones hace posible mantener la descarga en un estado de energía mínima en un periodo que permite a la mezcla formarse y minimizar la presión de implosión, lo cual constituye una combinación óptima para la formación de la aleación amorfa.

El efecto más espectacular producido por aleaciones amorfas preparadas por la invención es el fenómeno de

detención de las grietas. La figura 3 ilustra un tratamiento de superficie no homogéneo que contiene aleación de tungsteno amorfa sobre la superficie. La estructura amorfa 5 rica en tungsteno constituye la parte más ligera de la capa blanca y está delimitada por una interfaz 2 con el material de base 3. Se puede observar una grieta 1 cuya propagación es detenida por la capa amorfa 5. En ausencia de esta fase amorfa, la grieta 6 de la izquierda puede, por otra parte, ser propagada a lo largo de la zona cristalina 4 hasta la superficie de la capa blanca. La presencia de una capa amorfa homogénea en toda la superficie a tratar es por lo tanto esencial para la calidad del tratamiento.

En lo que sigue se verá cómo garantizar la deposición regular sobre toda la superficie a tratar, proporcionando a la pieza sorprendentes propiedades, a saber, elevada resistencia mecánica asociada con extraordinaria tenacidad. Cuando se utiliza la pieza, una tal barrera amorfa 5 constituirá una protección altamente efectiva contra la formación de grietas y el desgaste.

Tales propiedades son el resultado de una modificación de la composición de la capa blanca del acero. En el caso de una pieza de acero, esta capa resolidificada está en realidad compuesta en su mayor parte, pero principalmente en la superficie, de una aleación amorfa de Fe, C y de los elementos de los nano-polvos, procediendo estos últimos del líquido dieléctrico, dando lugar a aleaciones amorfas, por ejemplo de Fe-W-C ó Fe-Ti-C, mientras que las fases cristalinas situadas debajo carecen de los mismos elementos que proceden de los nano-polvos. En comparación con una superficie normal, que use el dispositivo del invento de la reivindicación 1, da lugar a una capa superficial que consiste en carburos que es transformada en una capa amorfa que contiene los materiales de los nano-polvos.

Mediciones de nano-mellas y de resistencia al desgaste confirman las propiedades de las superficies modificadas con la ayuda de suspensiones de nano-polvos en el líquido dieléctrico utilizado en el dispositivo del invento de la reivindicación 1. En el caso de Mo, la nano-densidad de la capa de acabado es 58 HRC, es decir un valor mayor que el de una capa de acabado normal de rugosidad equivalente (Ra 0,25 µm) de aproximadamente 52 HRC. En lo que se refiere a la resistencia a la fricción, ensayos tribológicos realizados usando esferas de metal duro contra una superficie de ensayo con cargas de 125 N para una condición de humedad del 50% y temperatura de 300°C, dan un resultado para desgaste de 20 a 33% inferior al de las capas estándar. La efectividad del tratamiento superficie queda por lo tanto demostrada por ensayos comparables a las tensiones experimentadas por moldes de inyección en aplicaciones industriales.

También pueden ser producidas aleaciones de aluminio amorfas en la superficie de piezas, que constituyen aleaciones de aluminio actualmente mecanizadas por descarga eléctrica. El uso de un par de nano-polvos del tipo de las tierras raras, asociado con un metal de transición de la lista precedente, como por ejemplo una mezcla de Y+Mo, hará posible producir capas amorfas más gruesas, siendo la función de la tierra rara impedir la cristalización de la aleación de aluminio de base durante el enfriamiento.

El tamaño de las partículas que establecen la aleación amorfa, suspendidas en el líquido dieléctrico, es un parámetro de primera importancia. Los ensayos han mostrado que polvos de tamaño micrométrico no pueden producir el efecto de formación del carácter amorfo y de evitación de grietas tal como se ha descrito anteriormente con un régimen de mecanización que use una potencia inferior a la que se emplea en el acabado. El efecto preventivo deseado es mayor a medida que el tamaño de las partículas activas se aproxima a un nanómetro. La siguiente tabla muestra la cantidad del elemento aleado sobre la superficie y la densidad lineal de grietas obtenidas siguiendo ensayos en los que han sido usadas suspensiones que contenían diferentes diámetros medios de polvos de tungsteno.

<i>Aditivo</i>	<i>Grietas pasantes/cm</i>	<i>% en peso de elemento aleado</i>
Sin aditivo	100	-
W 1-5 µm	43	9
W 0,9 µm	28	14
W 80 nm	9	15

La rugosidad de superficies obtenidas es de 0,25 µm Ra. El espesor de la capa blanca modificada es de aproximadamente 3,5 µm. Para el último régimen de acabado, el dieléctrico estándar es sustituido por un líquido que contiene nano-partículas suspendidas, con las siguientes condiciones de mecanización y parámetros:

- Electrodo: cobre
- Acero tratado: Böhrer W300 (DIN X38CrMoV5-1). La composición química en porcentaje en peso es: C 0,38, Si 1,10, Mn 0,40, Cr 5, Mo 1,3, V 0,4
- Polaridad negativa de los electrodos

- Corriente de pico o máxima: 3 A
  - Corriente de deposición: 0,5 A
  - Duración media de la corriente de deposición: 4  $\mu$ s
  - Concentración del aditivo que se ha de alear: 2 g/l en volumen equivalente de carbono
- 5 - Area tratada: 2x2 cm<sup>2</sup>

Con el fin de aumentar la cantidad del elemento aleado en la superficie (3ª columna), se ha de reducir el tamaño de las partículas (1ª columna). Para reducir la densidad lineal de grietas en las superficies tratadas (2ª columna), se ha de reducir el tamaño de las partículas.

10 La siguiente tabla da también las cantidades de elementos aleados (3ª columna) en la superficie y las densidades lineales de grietas (2ª columna) obtenidas siguiendo ensayos en los que se usaron suspensiones de nitruro de titanio y nitruro de molibdeno con el dispositivo de la reivindicación 1 como una comparación con un ensayo sin un aditivo. Los tres ensayos fueron realizados sobre las superficies de piezas de 2x2 cm<sup>2</sup>.

<i>Aditivo</i>	<i>Grietas pasantes/cm</i>	<i>% en peso de elemento aleado</i>
Sin aditivo	100	-
TiN-60 nm	8	6
Mo-80 nm	0	25

15 Es de observar el resultado sorprendente obtenido con la suspensión de molibdeno en relación con el dispositivo del invento, un resultado que hasta ahora no han hecho posible otros métodos conocidos. Sin embargo, la presencia de las citadas partículas nanométricas en el líquido de mecanización es insuficiente por sí sola para garantizar la consecución del tratamiento de superficie deseado. La mecanización por descargas eléctricas tiene riesgos de localización, especialmente en el acabado, es decir existe el riesgo de que el tratamiento de la superficie quede limitado a zonas parciales de la pieza (véase la figura 3). La presencia de nano-partículas solas no hace posible  
 20 producir una distribución de ignición uniforme como es sabido a partir de diversos contaminantes artificiales. Ciertamente, el hecho de trabajar prácticamente sin eliminación de material implica que la contaminación en el espacio de separación consiste solamente en nano-partículas y posiblemente en desechos de mecanización de un tamaño comparable. El espacio de separación definido por estas partículas, típicamente del mismo orden de magnitud, será por lo tanto demasiado pequeño en comparación con las irregularidades del electrodo y de la pieza,  
 25 especialmente cuando las superficies que se han de trabajar son grandes. Estas condiciones introducen un elevado riesgo de la desestabilización de la mecanización y de provocar un deterioro de la superficie debido a cortocircuitos.

El dispositivo del invento incorpora medios que hacen posible garantizar la uniformidad del tratamiento superficial en toda la superficie del electrodo-pieza sumergido en el espacio de separación de mecanización. Uno de estos medios consiste en utilizar otra categoría de contaminante en suspensión en el líquido de mecanización, como se describe  
 30 en las patentes CH 627 393 ó EP 0 314 711 citadas a modo de ejemplos. El tamaño medio de las partículas destinadas a la homogeneización ha de ser preferiblemente menor de un orden de magnitud que el tamaño del espacio de mecanización. Para esta función de mecanización, es posible utilizar polvos de conducción de aluminio, hierro o cobre, o polvos de semi-conducción tales como grafito o carbono de varias formas, como, por ejemplo, las microfibras de carbono descritas en el documento EP 1 127 647. Se conoce que el efecto producido por tales  
 35 partículas permite obtener estados más regulares de la superficie con tiempos de mecanización más cortos. En lo que se refiere a las condiciones para agitar el dieléctrico que permiten la estabilización homogénea de la mezcla de distribuciones, la formación de chispas es distribuida de manera homogénea en la superficie. Análogamente, puesto que los tiempos de retardo de la ignición tienen también una distribución más homogénea, la energía de las descargas será también más homogénea.

40 La adición de una distribución de polvos micrométricos de partículas de grafito o aluminio participa en la producción de un depósito que está bien distribuido en la superficie y esto a todas las calidades de superficies, sin influenciar la cantidad o las propiedades del depósito producido a partir de los materiales de nano-polvos y del líquido dieléctrico. Estas micro-partículas ayudan así en la definición del tamaño del espacio de separación ideal para la homogeneización del proceso y además contribuyen a una reducción adicional de la energía de la chispa mientras  
 45 se aumenta la longitud de la columna del plasma de descargas y por lo tanto la energía disipada en el punto de unión de las chispas. Es menos probable que las partículas micrométricas participen en la transferencia de material y en el proceso de resolidificación y en la formación de una aleación amorfa, ya que este proceso ocurre a la escala de los puntos en que se unen las chispas, del orden de un micrómetro para la mecanización de acabado.

Usando, por ejemplo, una suspensión de grafito con un diámetro medio de 5 micrómetros y nano-polvos con un

diámetro medio de 80 nm en relación con el dispositivo del invento, es posible obtener depósitos homogéneos exentos de grietas, formando los nano-polvos la parte esencial de la aleación de superficie amorfa, produciendo la segunda distribución de contaminante la homogeneización del depósito a una escala macroscópica.

Se recomienda, de acuerdo con la invención, utilizar dos tipos de partículas en el líquido dieléctrico del dispositivo del invento según se define en la reivindicación 1, cuyas respectivas distribuciones de tamaño son claramente diferentes: es decir, una distribución nanométrica destinada a crear la aleación y una distribución micrométrica que depende del espacio de separación de mecanización impuesto por las condiciones de voltaje entre los electrodos. Las partículas del primer tipo suspendidas en el líquido dieléctrico están caracterizadas, de acuerdo con la invención, por un diámetro medio situado entre 1 nanómetro y 1 micrómetro, y preferiblemente entre 1 nanómetro y 0,3 micrómetros, mientras que la distribución del tamaño de partículas del segundo tipo tiene preferiblemente un diámetro medio menor que 50 micrómetros y mayor que 0,1 micrómetros. Las concentraciones de dichos polvos, según es recomendado por la invención, están situadas entre 0,1 g/l y 50 g/l en volumen equivalente de carbono. Los polvos pueden ser proporcionados, por ejemplo, por las siguientes empresas:

“Nanostructured & Amorphous Materials Inc.”, 820 Kristi Lane, Los Alamos, NM 87544 (<http://www.nanoamor.com/>), “Inframat Advanced Materials LLC”, 74 Batterson Park Road, Farmington, CT 06032, USA (<http://www.advancedmaterials.us/>).

Como es sabido, los polvos micrométricos destinados a homogeneizar pueden, en algunas aplicaciones, ser ventajosamente utilizados como un revestimiento que se ha de aplicar a uno u otro de los electrodos. Usualmente se emplean diversos medios para cubrir un electrodo con un polvo micrométrico. Se pueden obtener comercialmente de manera fácil dispositivos para rociar suspensiones de polvos de grafito del tipo Graphit 33 (CRC Industries Deutschland GmbH) o polvos de aluminio (Alu spray A100, Weicon). Se deben habilitar medios para renovar el depósito periódicamente de acuerdo con la duración del tratamiento. A este fin, se utilizarán, por ejemplo, funciones automáticas de la máquina que permitan que la mecanización se detenga al final de un tiempo dado. Para electrodos de gran tamaño, los sistemas que son más apropiados son los de deposición mediante rociado electrostático desde un baño en el que está situada la suspensión micrométrica.

De experimentos realizados en particular en CRPP de la EPFL [A, Descoeurdes et al. J. Phys. D: Appl. Phys. 38, 4066 (2005)], se conoce que la eliminación de material ocurre principalmente al final de la chispa por un efecto de implosión del plasma de la descarga en contacto con el metal fundido y la efectividad del desprendimiento del cráter depende esencialmente de la pendiente de extinción de la corriente  $\Delta i/\Delta t$  que precede al paso de la corriente de chispas a cero. De ese modo, la desaparición brusca de la corriente está asociada con una gran eliminación de material. En el caso de la presente invención, esto consiste en minimizar este efecto, ya que la mezcla de nano-partículas con el material de la pieza puede ser destruida.

Dado que la eliminación de material es proporcional a la presión de implosión del plasma al ser extinguido, es importante hacer mínima esta presión de implosión con el fin de permitir que se forme la aleación en la capa resolidificada. Cuando ocurre la implosión, los nano-polvos en suspensión son los primeros que van a ser proyectados sobre la pieza por medio de la onda de choque. La presión del plasma determina el grado de eliminación del material fundido por la chispa y por lo tanto la cantidad de aleación formada en la superficie. Esta presión es esencialmente proporcional a la densidad de electrones y de hierro del plasma y su temperatura. [“Optical Spectroscopy of Electrical Machining Plasmas” (“Espectroscopia óptica de plasmas de mecanización eléctrica”), tesis por A. Descoeurdes, EPFL, 2006]. Como la densidad de electrones puede ser modulada por la corriente de la descarga, bajas corrientes harán posible reducir la presión de implosión en la extinción. Además, la densidad electrónica disminuye con el tiempo de duración de la descarga por razones del desarrollo del canal de plasma. La presión de implosión disminuye también con la duración de la descarga.

La utilización óptima de nano-polvos en un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1 implica necesariamente el uso de bajos regímenes de energía. Se ha verificado que la cantidad de aleación amorfa disminuye con un aumento de la energía de descargas, y el uso de descargas de energía demasiado grandes impide la formación de las citadas aleaciones. Además, cuando se hace un intento de realizar la mecanización con nano-partículas a partir de regímenes de mecanización basta, no es obtenido el resultado previsto puesto que el efecto de partículas derivadas de contaminación natural producida durante la mecanización basta oculta el efecto de los nano-polvos en el acabado final. El dieléctrico debe ser, por lo tanto, necesariamente una suspensión verdadera de nano-polvos asociados con polvos micrométricos en una suspensión o el revestimiento de uno u otro electrodo con una fina capa.

Bajas energías de descarga favorecen la formación de la aleación amorfa. En la presencia de cortas chispas con una duración idéntica, los conceptos de energía y potencia son virtualmente equivalentes. Por otra parte, cuando están implicadas descargas que pueden ser largas y además de duración indeterminada, como sucede con descargas con extinción espontánea, se ha de hacer referencia a la potencia. En un caso similar, puede ser necesaria una corriente relativamente alta al comienzo de la descarga con el fin de evitar cualquier riesgo de extinción y la corriente es entonces disminuida lentamente con el fin de favorecer la extinción espontánea. En lo que se refiere a la calidad de la aleación, es entonces necesario tener en cuenta la potencia usada antes de la extinción y no la energía total de la descarga, que puede ser grande. La extinción espontánea proporciona de manera natural



la energía (o potencia) instantánea óptima para la formación de la aleación.

La extinción del plasma de mecanización por descargas eléctricas se realiza normalmente desconectando la corriente externa que lo alimenta. En esta descripción, se elegirá llamar "extinción espontánea" a la extinción de la descarga erosiva provocada por causas o condiciones que son intrínsecas al plasma, como contraposición a la extinción forzada, que puede ser provocada usualmente por el comportamiento del circuito eléctrico conectado a los terminales del espacio de separación o bajo condiciones extremas, lo que no concierne a este caso, por la rápida separación de los electrodos.

De acuerdo con la invención, se propone excluir causas externas al plasma que probablemente obligan a su extinción, ello al elegir los parámetros esenciales para el proceso, tales como, por ejemplo, los valores del voltaje, corriente, secuencias de aplicación, formas de onda, de manera que se favorezca la aparición de la extinción espontánea. Los dispositivos y métodos que hacen posible hacer estas elecciones se exponen en lo que sigue.

Entre las causas externas que probablemente obliguen a la extinción están principalmente: la acción de desconectar la corriente suministrada por la fuente o de hacerla disminuir demasiado rápidamente; cortocircuitar el espacio de separación; o hacer o permitir que oscile el circuito de descarga.

Las chispas con extinción espontánea están caracterizadas por baja potencia erosiva, lo que es favorable para el método de tratamiento de superficies, pero aquellas también poseen una ventaja inesperada: ha sido verificada que una sucesión de chispas con extinción espontánea no chocan o inciden en el mismo lugar, lo que participa efectivamente en la homogeneización de la producción de la aleación amorfa. Puesto que la corriente que llega desde la fuente es insuficiente y del hecho de que la extinción es además natural, esto significa que el punto de unión de la descarga resulta incapaz de crear una vez más la necesaria emisión de electrones para mantener el plasma [véase Current Zero Phenomena (Fenómenos de corriente cero) G.A. Farral, en "Vacuum Arcs" ("Arcos en vacío"), Wiley, 1980]. En este caso, la probabilidad de localización de las chispas y decaimiento en un arco es prácticamente nula, todo lo más como otros puntos de unión que es probable que aparezcan en cualquier lugar. Esta conjunción de probabilidades es reforzada por la presencia de micropartículas en cualquier lugar distinto de la zona en que han sido extinguidas las chispas. El uso de micropartículas asociadas con chispas con extinción espontánea hace por lo tanto posible garantizar la producción de una aleación de superficie homogénea sobre una superficie exenta de defectos asociados con la localización.

Es sabido, por el trabajo citado anteriormente, que las características de extinción dependen fuertemente, en un dieléctrico dado, de los metales que constituyen los electrodos y que la estabilidad del arco de mecanización por descargas eléctricas depende de la energía que pasa a través de ellos. Se encontrarán duraciones medias en la bibliografía para plasmas medidos en aire o en un vacío como una función de la corriente. En lo que se refiere al caso particular de la invención, en el que se hace uso, por ejemplo, de un par de materiales, cobre-acero, sumergidos en un dieléctrico acuoso o en uno basado en aceites, es posible definir un campo operacional típico experimentalmente de una manera aproximada. Es posible verificar, por ejemplo, que es prácticamente imposible mantener un plasma de mecanización por descargas eléctricas más allá de una duración de 100  $\mu$ s si se alimenta con una corriente inferior a 2 A. Por otra parte, la probabilidad de extinción de un arco con una duración limitada a 100 ns, alimentado con 4 A, es prácticamente nula. De este modo, ha sido delimitado un campo empírico por valores de corriente  $I < 5$  [A] y duraciones de impulsos  $T < 2 \cdot 10^4$  [ $\mu$ s], un campo en el que es virtualmente imposible la extinción espontánea y hace posible definir un primer impulso de corriente durante el cual se funde un fragmento calibrado de metal. Este impulso es inmediatamente seguido sin una pausa por un segundo impulso caracterizado por una reducción suficiente de la corriente que hace posible crear las condiciones para la extinción espontánea dentro de un periodo compatible con el método, a saber, un periodo normalmente menor que 500  $\mu$ s. Por lo tanto, el impulso de corriente es extendido en un periodo indeterminado hasta el momento en que es extinguido el plasma. Como sugieren también las enseñanzas de George A. Farral, la probabilidad de que un plasma sea extinguido fuertemente aumenta cuando se hace mayor la pendiente de la disminución de la corriente. En consecuencia, es posible considerar las características del impulso de corriente que permiten que se prolongue la duración de la chispa y se favorezca la extinción espontánea del plasma.

Con el fin de llevar a cabo un tratamiento de superficie de acuerdo con la invención, es necesario que, al comienzo de la descarga, un fragmento de metal sea en primer lugar fundido antes de que sean incorporados contaminantes activos en el mismo. Durante este periodo, el plasma no debe ser extinguido y de ahí el nombre "periodo de mantenimiento"  $T_m$  dado a este lapso de tiempo con una duración predeterminada durante la cual el valor de la corriente es mayor que un límite denominado la "corriente de extinción"  $I_{ext}$  (véase la figura 4).

Los valores del par de parámetros  $I_{ext}$  [A],  $T_m$  [ $\mu$ s] serán elegidos dentro del campo típico definido por valores de corriente  $I < 5$  [A] y duración de impulsos  $T_m < 2 \times (I_{ext})^4$  [ $\mu$ s], preferiblemente  $T_m < 0,2 \times (I_{ext})^4$  [ $\mu$ s]. El periodo de mantenimiento  $T_m$  está usualmente precedido por un periodo  $T_d$  con una duración indeterminada durante la cual se aplica un voltaje de ignición  $U_{ign}$  a los terminales del espacio de separación. El periodo  $T_d$  de retardo de ignición termina en una caída súbita  $\tau$  del voltaje de ignición  $U_{ign}$  hasta un voltaje de arco  $U_e$ , una caída que hace posible detectar el momento de la ignición.

El periodo de mantenimiento  $T_m$  comienza con una elevación de la corriente cuya forma ideal es bien conocida. Un

- 5 primer paso  $I_{gn} > I_{ext}$  debe ser alcanzado inmediatamente con el fin de evitar el riesgo de extinción al comienzo de la descarga. La corriente debe elevarse a continuación hasta su máximo siguiendo una pendiente óptima  $\delta$  que sirve usualmente para limitar el desgaste. El periodo de mantenimiento  $T_m$  termina con un descenso más o menos brusco de la corriente  $I_9$  hasta un valor  $I_d$  menor o igual que  $I_{ext}$  para que la extinción espontánea del plasma resulte posible. Este momento marca el comienzo de un periodo que se dice que es un periodo de extinción  $T_{ext}$  de duración indeterminada. Al ser la duración de los tiempos de extinción  $T_{ext}$  de una naturaleza aleatoria, cada muestra de  $T_{ext}$  sucesiva ha de medirse y memorizarse.
- 10 Se ha de entender, por supuesto, que las variaciones de corriente en el circuito de descarga no han de provocar en ningún caso oscilaciones transitorias que produzcan probablemente la extinción prematura. Se han de tomar precauciones en el uso para que, en particular, el paso de la corriente máxima de mantenimiento  $I_m$  al valor  $I_d$  de la corriente en el comienzo del periodo de extinción  $T_{ext}$  no lleve a cabo la extinción. Esto se puede obtener, como sabrá una persona experta, en particular adaptando los parámetros eléctricos del circuito de descarga y modulando la forma de la corriente suministrada por la fuente.
- 15 Al final del citado periodo de mantenimiento  $T_m$  la descarga de corriente entra en el periodo de extinción  $T_{ext}$ , que ha de finalizar, en la mayoría de los casos, en la extinción espontánea del plasma. Se pueden obtener condiciones de extinción durante este periodo manteniendo una corriente constante, pero preferiblemente haciendo que esta corriente disminuya moderadamente, es decir limitando su pendiente de descenso a un valor favorable para la formación de la aleación amorfa. Este valor de limitación de  $\Delta i/\Delta t$ , de acuerdo con los experimentos, ha de ser menor que 5 A por microsegundo y preferiblemente menor que 1 A por microsegundo.
- 20 Habiendo sido tomadas precauciones en uso para evitar extinciones provocadas por causas extrínsecas al plasma, se distingue la extinción espontánea y puede ser detectada por la aparición, dentro de un lapso de tiempo del orden de la constante de tiempo del circuito de descarga, de un aumento súbito  $I_{10}$  del voltaje en los terminales del espacio de separación acompañado por la desaparición de la corriente de mecanización  $I_{11}$ .
- 25 Si la fuente de voltaje que suministra el voltaje de ignición  $U_{ign}$  antes de la ignición ha sido mantenida conectada al espacio de separación de mecanización, la aparición del citado sobre-voltaje será seguida en los terminales del espacio de separación por un voltaje que es una vez más establecido en el valor  $I_{12}$  del voltaje de ignición  $U_{ign}$ . Una tal clara transición entre el voltaje del plasma  $U_e$  y el voltaje de ignición  $U_{ign}$  facilita la detección de la extinción espontánea.
- 30 Si, por otra parte, ha sido desconectada la fuente de voltaje que suministra el voltaje de ignición  $U_{ign}$  antes de la ignición, dicho sobrevoltaje es seguido por un retorno a cero voltios o al valor del voltaje interno de la fuente de corriente. En este último caso, si no es detectado un sobrevoltaje súbito, sino que desaparece simplemente la corriente, tal extinción no es considerada espontánea. La fuente de voltaje  $U_{ign}$  ha de ser, en este caso, vuelta a conectar entonces de manera que se realice la siguiente ignición. Este caso particular no está mostrado en la figura 4.
- 35 En razón del ruido presente en la señal de voltaje  $U_e$  durante la descarga erosiva, es preferible fijar límites claros que hagan posible que se distinga la extinción espontánea con un riesgo mínimo de error. Será posible, por ejemplo, seleccionar los siguientes valores para producir un detector: dentro de un periodo de 200 ns, el voltaje del plasma ha de haber sido incrementado en al menos 20% y la corriente que pasa a través del espacio de separación ha de haber caído en al menos 80% para que la extinción se considere espontánea.
- 40 También se han de especificar los casos  $I_{13}$  en los que no se ha producido la extinción espontánea. Se observa un tiempo  $T_{max}$  más allá del cual la extinción  $I_{14}$  es obligada cortocircuitando el espacio de separación o desconectando su alimentación de corriente durante un periodo  $T_{ef}$ .
- 45 Pero, para este último caso, en el que las extinciones de late requieren que se haga una pausa  $T_{ef}$ , el método hace posible no hacer una pausa en la mayor parte del tiempo. Esto constituye una ventaja desde el punto de vista de la producción de las descargas, ya que el espacio de separación es permanentemente alimentado.
- En lo que sigue se presentan dispositivos especiales que permiten la extinción espontánea. En primer lugar, es necesario medir dos parámetros representativos del estado del proceso: la velocidad de las extinciones espontáneas  $T_X$  y la duración media  $M_{text}$  de los periodos de extinción  $T_{ext}$  de las descargas.
- 50 Con el fin de establecer la velocidad de las extinciones espontáneas  $T_X$ , es necesario determinar si cada extinción sucesiva es una extinción espontánea o no. Las extinciones acompañadas por un sobre-voltaje súbito  $I_7$  y la desaparición de la corriente de mecanización  $I_{11}$  se situarán en la primera categoría. Todas las demás, a saber, las de una duración excesiva  $I_{13}$  y en las que sea necesario extinguirlas por la acción externa, o aquellas cuya extinción es acompañada por la desaparición de corriente sin la aparición de sobre-voltaje suficiente, se situarán en la segunda categoría.
- 55 Supóngase que  $N_{sp}$  es el número de extinciones de la primera categoría y  $N_{reg}$  el número de extinciones de la segunda categoría. Distinguiendo un número suficiente de descargas sucesivas, se calcula periódicamente el

cociente  $TX_n = 100 \times N_{esp} / (N_{esp} + N_{reg})$ , que puede variar entre 0 y 100. Este cálculo puede ser realizado mediante la unidad de control CP (véase la figura 6), por ejemplo cada cien chispas.

5 Conociendo cómo detectar el instante en que se producen las extinciones espontáneas, es fácil determinar la duración Text de cada descarga que ha terminado en la extinción espontánea y calcular una Mtext media de las citadas duraciones para un gran número de descargas. Variando ciertas características de la descarga de corriente durante el periodo de extinción Text, como por ejemplo el valor inicial Id de la corriente o su pendiente inicial, se encuentra que es posible llevar a cabo la extinción espontánea de una parte más o menos grande del número de chispas o es posible variar la duración media de descargas con extinción espontánea.

10 Con el decaimiento de corriente de acuerdo con una función de decaimiento dada durante el periodo de extinción, es posible variar el valor inicial Id de la corriente de extinción. Entonces se encuentra que el número TX aumenta cuando Id disminuye, e inversamente. También se encuentra que la duración media Mtext disminuye cuando disminuye Id, e inversamente. Por lo tanto, es posible utilizar ya sea TX o Mtext como indicadores que hacen posible ajustar la corriente Id, o como parámetros de regulación para crear un regulador para la corriente Id.

15 Con el número de extinciones TX elegido como un parámetro de regulación y una función dada de decaimiento de corriente para la corriente, las operaciones se producen de la siguiente manera, como se simboliza en el diagrama de regulación de la figura 5. Un dispositivo 18 calcula el número de extinciones espontáneas TXn. Un dispositivo de cálculo 15 calcula la diferencia aritmética entre la velocidad de referencia previamente establecida TXref de descargas con extinción espontánea y el número real TXn medido. Un regulador 16 controla el aumento o la disminución de la corriente Id con un incremento de ajuste ΔId de un valor usualmente adaptado a las condiciones de estabilidad del regulador. Si  $TX_n < TX_{ref}$ , entonces  $\Delta Id < 0$ , e inversamente. Un dispositivo 17 que genera una corriente Id realiza la variación regulada que producirá un nuevo valor TXn+1. Los dispositivos de regulación 15, 16, 20 17, 18 forman parte de la unidad de control CP del proceso de la figura 6. De ese modo es posible regular la corriente Id al comienzo del periodo de extinción Text de manera que se establezca y mantiene una mayoría de extinciones espontáneas, preferiblemente cercana al 100%, por ejemplo 90%.

25 Eligiendo como parámetro de regulación la duración media Mtext de descargas con extinción espontánea, con una función de decaimiento dada para la corriente, las operaciones de regulación se producen de acuerdo con un modelo similar al caso previamente detallado e ilustrado en la figura 5, sabiendo que cuanto menor es la corriente inicial Id, más corto es el periodo de extinción medio Mtext. Es posible regular la corriente Id al comienzo del periodo de extinción Text de manera que se establezca y mantenga la duración media Mtext de descargas con extinción espontánea alrededor de un valor previamente establecido favorable al proceso. Con el fin de simplificar la descripción, no han sido elaborados detalles de tal regulador.

El establecimiento de los citados parámetros de regulación TX ó Mtext de ningún modo requiere tiempos cortos de proceso dado que han de operar contra-reacciones correspondientes dentro de periodos del orden de cientos o incluso miles de descargas.

35 La ley de decaimiento para la corriente durante el periodo de extinción Text puede no ser lineal de acuerdo con los dispositivos utilizados. No obstante, con cualquier función de decaimiento de corriente es preferible regular el valor inicial de la corriente de manera que se obtengan los mismos efectos.

Ajustando la pendiente de decaimiento de la corriente se ha visto que es posible controlar la concentración de la aleación. A partir de una corriente de extinción inicial fija Id es entonces posible con este objetivo variar la pendiente de decaimiento  $\Delta i / \Delta t$  de la corriente al comienzo del periodo de extinción Text. Entonces se encuentra que el valor TX aumenta cuando  $\Delta i / \Delta t$  disminuye, e inversamente. También se encuentra que la duración media Mtext aumenta cuando  $\Delta i / \Delta t$  disminuye, e inversamente. Por lo tanto, es posible utilizar ya sea TX ó Mtext como indicadores que hacen posible ajusta la pendiente de decaimiento  $\Delta i / \Delta t$ , o como parámetros de regulación con el fin de crear un regulador para esta pendiente.

45 En el mismo modelo de controlador que el simbolizado en las figura 5, se utilizará el número de extinciones espontáneas TXn como un parámetro de regulación para guiar un regulador que reducirá o aumentará progresivamente la citada pendiente  $\Delta i / \Delta t$  del decaimiento de corriente en el comienzo del periodo de extinción, permaneciendo fija la corriente inicial Id. Manteniendo esta pendiente menor que 5 A/μs, preferiblemente menor que 1 A/μs, un tal regulador hace posible mantener un número de extinciones espontáneas en un valor previamente establecido próximo a 100%.

50 Similarmente, un regulador basado en las descargas de duración media Mtext durante su periodo de extinción, reducirá o aumentará progresivamente la citada pendiente  $\Delta i / \Delta t$  durante el decaimiento de la corriente al comienzo del periodo de extinción desde una corriente inicial fija Id y hará posible mantener una duración media próxima a un valor de referencia establecido de antemano que sea favorable a la formación de la aleación amorfa. Similarmente, con el fin de no sobrecargar la descripción, no han sido elaborados detalles de estos dos últimos controladores.

Controlando la extinción de descargas para una condición dada del proceso que define la rugosidad final y el espacio de separación, es por lo tanto posible hacer óptima la producción de la aleación amorfa en la superficie de

la pieza que se ha de tratar.

En lo que se refiere a dispositivos que hacen posible ejecutar el método de acuerdo con la invención, se pueden mencionar generadores de impulsos como ejemplos, tales como los descritos en la patente EP 1 063 043. El generador de mecanización mostrado en la figura 1 de este último documento y reproducido en la figura 6 del presente documento, comprende un dispositivo CP diseñado para controlar el proceso recogiendo sus diversos parámetros representativos. Este generador está usualmente caracterizado por una fuente de voltaje E3, mostrada a la derecha de un espacio de separación G de mecanización y que asegura la ignición de las descargas erosivas. Esta fuente E3 suministra un voltaje relativamente elevado, por ejemplo de 200 V, cuando es nula su corriente suministrada I3. Cuando ocurre la ignición, el voltaje en los terminales del espacio de separación G disminuye bruscamente hasta el voltaje del plasma de mecanización por descargas eléctricas, por ejemplo 25 a 30 V. Esta caída hace posible detectar la ignición y suministrar en paralelo con I3 en el espacio de separación de mecanización una corriente I2 suministrada por la fuente de corriente real mostrada a la izquierda de la figura. Esta fuente de corriente consiste, en particular, en diodos D1, D2, D3, conmutadores S1, S2, una bobina L1 de autoinducción (bobina de inducción) y dos fuentes internas E1, E2, que suministran voltajes relativamente bajos, de aproximadamente 3 a 30 V. Se ha de observar que esta última fuente de corriente está diseñada para regular la pendiente de elevación de corriente diseñada para limitar el desgaste a valores extremadamente bajos, pero no hace posible generar ninguna forma de corriente.

A fin de adaptarse a la invención, y de acuerdo con prácticas conocidas, se han de adaptar conjuntamente en impedancia varias fuentes al circuito de descarga que las conecta al espacio de separación. Además, el factor de calidad Q del circuito de descarga será dimensionado de manera que se obtengan oscilaciones muy limitadas que no hagan que la corriente pase por debajo del umbral de extinción natural  $I_{ext}$ . La presente invención está caracterizada por una secuencia particular de acuerdo con la cual son guiados los conmutadores S2 y S3. Esta secuencia es diferente de la mostrada en la figura 8 del documento EP 1 063 043, en el que los conmutadores S2 y S3 bloquean simultáneamente las corrientes I2 e I3, forzando de este modo la extinción del plasma de mecanización por descargas eléctricas.

De una manera diferente, la presente invención específica, en una realización preferida, que la fuente denominada la fuente de ignición E3 ha de continuar suministrando una pequeña corriente I3 incluso si la propia fuente de corriente ha cesado de suministrar su corriente I2. El plasma de mecanización por descargas eléctricas se usa como un conmutador natural que corta el flujo de corriente a través del espacio de separación después de un periodo indeterminado. El fenómeno de ignición, como es tradicionalmente utilizado, actúa de una manera similar al conmutador natural que abre el paso a la corriente a través del espacio de separación. Desde el punto de vista de los circuitos eléctricos, la invención propone por tanto el uso de las dos transiciones de este conmutador natural tanto para abrir como para cerrar.

En el ejemplo de una realización mostrada en la figura 6, la función de decaimiento de la corriente durante el periodo de extinción puede ser generada y controlada por la fuente de voltaje E3, la cual asegura también la ignición de las descargas erosivas. En este caso, esta última fuente se mantiene permanentemente conectada en el espacio de separación a menos que sea necesario forzar la extinción de una descarga excesivamente prolongada.

De una manera más ventajosa, es posible elegir, para generar y controlar la pendiente al comienzo de la función de decaimiento, la corriente con la ayuda de una fuente de corriente diseñada para producir cualquier forma de corriente, tal como la descrita en el documento EP 1 493 522. En este caso, la fuente de voltaje destinada a la ignición puede ser posiblemente desconectada después de la ignición de manera que no se sume su corriente a la de la fuente de corriente. No obstante, la detección de la extinción permanece posible, como se ha mencionado anteriormente, en razón de la presencia de una bobina de inducción L2 en la línea que alimenta el espacio de separación. Esta bobina de inducción produce un sobre-voltaje momentáneo cuando el plasma de la descarga se transforma súbitamente en una resistencia de aislamiento en el momento de la extinción.

Se ha de entender que los diversos dispositivos descritos anteriormente con el objetivo de ejecutar el método de tratamiento de superficie de ningún modo tienen carácter limitativo y pueden recibir cualesquiera limitaciones deseables dentro del marco definido por la reivindicación independiente. Se pueden utilizar dieléctricos acuosos con agentes tensioactivos u otros aditivos que ayuden a la estabilización de la dispersión de la mezcla de nano-polvos, por ejemplo alcoholes, glicoles o acetona. También es posible modular el pH del agua de manera que se reduzca la fuerza de atracción de nano-partículas.

El método de tratamiento de superficie descrito anteriormente no está limitado a aplicaciones denominadas de inmersión EDM, en las que una herramienta de electrodo con una forma particular introduce una pieza de electrodo e imprime su geometría en ella. También se aplica a la mecanización por descargas eléctricas con la ayuda de un alambre de electrodo o de un electrodo rotativo que se mueve a lo largo de una trayectoria.

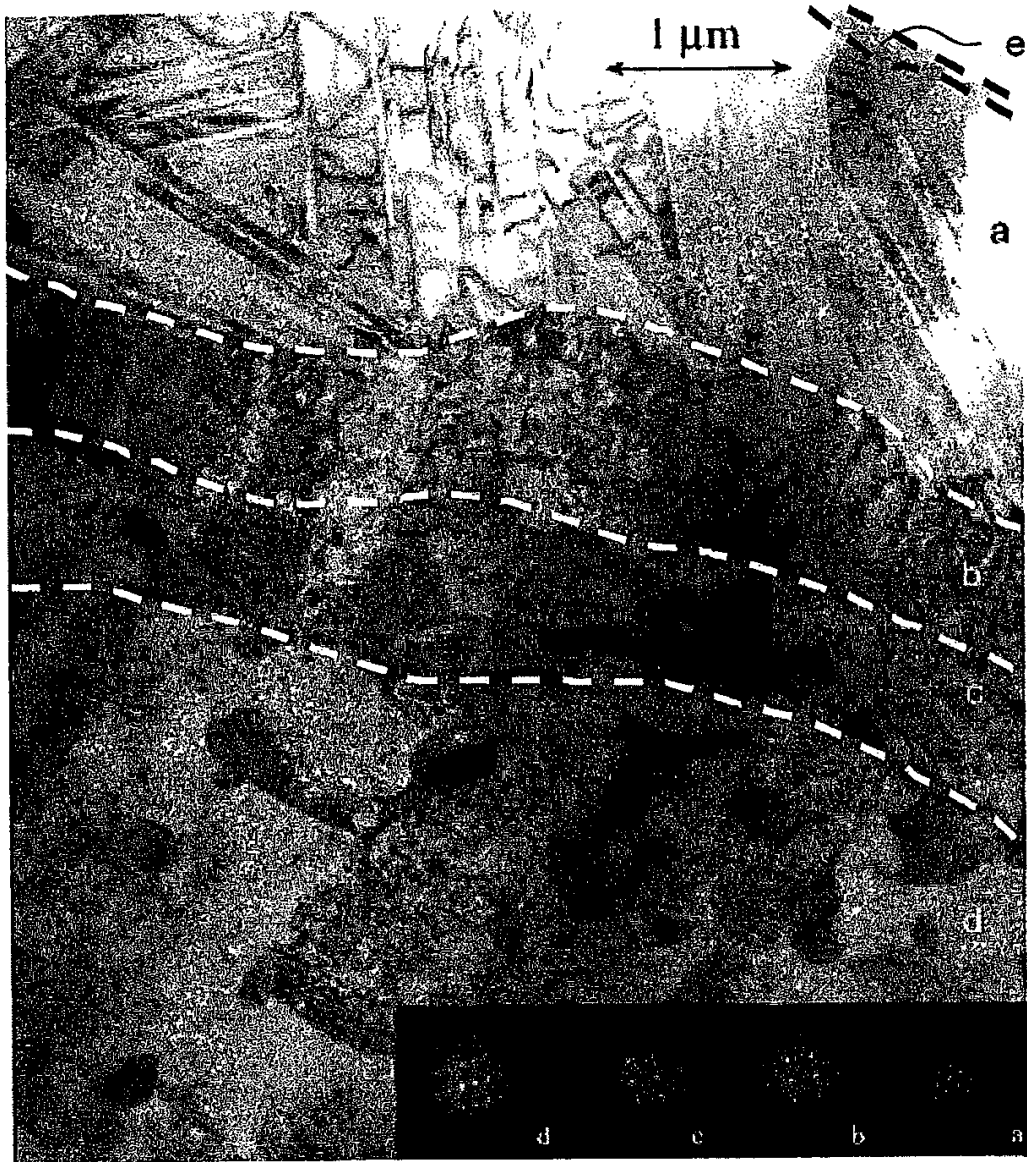
El método de tratamiento de superficie descrito anteriormente no está limitado a aplicaciones denominadas de inmersión EDM, en las que una herramienta de electrodo con una forma particular introduce una pieza de electrodo e imprime su geometría en ella. Se aplica también a la mecanización por descargas eléctricas con la ayuda de un alambre de electrodo o de un electrodo rotativo que se mueve a lo largo de una trayectoria.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Dispositivo para tratamiento de superficies que se realiza aplicando impulsos eléctricos entre un electrodo-herramienta y un electrodo-pieza, separados por un espacio intermedio o espacio de separación lleno con un líquido dieléctrico, que comprende un dispositivo de regulación y al menos una fuente de voltaje de ignición conectada al espacio de separación por medio de un circuito de descarga, estando el conjunto dispuesto para minimizar la eliminación de material y para homogeneizar el tratamiento superficial, estando dicho dispositivo caracterizado porque incluye medios para medir, regular y generar descargas que están adaptadas a elegir los parámetros del proceso de manera que se favorezca la extinción espontánea del plasma de mecanización por descargas eléctricas y producir descargas de corriente que siguen inmediatamente al instante de ignición del plasma de mecanización por descargas eléctricas, por lo que las citadas descargas comprenden dos periodos sucesivos,

10 - un primer periodo (Tm), denominado un periodo de mantenimiento, durante el cual la corriente es controlada para que sea mayor que un límite (Text), siendo dicho periodo (Tm) suficientemente breve para que no se produzca la extinción espontánea,

15 - un segundo periodo (Text) denominado periodo de extinción, con una duración indeterminada durante la cual la corriente es controlada para que sea menor o igual que el mismo límite (Text) para imponer la extinción espontánea.
- 20 2. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque los medios de medición detectan la extinción espontánea, es decir el instante en que es provocada la extinción por causas o condiciones intrínsecas al plasma, por la aparición (10) dentro de un lapso de tiempo del orden de la constante de tiempo del circuito de descarga, de un sobre-voltaje súbito del plasma de mecanización por descargas eléctricas visto en los terminales del espacio de separación, acompañada por la desaparición (11) de la corriente de mecanización.
- 25 3. Dispositivo de acuerdo con las reivindicaciones 1 y 2, caracterizado porque mide la duración del periodo de extinción (Text).
4. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado porque cesa de suministrar corriente al espacio de separación o lo cortocircuita durante un corto periodo (Tef) si hay riesgo de que se produzca tarde la extinción espontánea y el periodo de extinción (Text) se extiende más allá de un periodo (Temax) más allá del cual resulta necesario forzar la extinción.
- 30 5. Dispositivo de acuerdo con las reivindicaciones 1, 2, 3 y 4, caracterizado porque los medios de regulación calculan una velocidad de las extinciones espontáneas  $TX_n = 100 \times N_{esp} / (N_{esp} + N_{reg})$  en la que Nesp representa extinciones espontáneas y Nreg el número de otro tipo de extinción, apareciendo uno u otro tipo de extinción durante una serie de descargas sucesivas.
- 35 6. Dispositivo de acuerdo con las reivindicaciones 1, 2 y 4, caracterizado porque calcula una duración media (Mtext) de descargas que han terminado en extinción espontánea, una media obtenida de los periodos de extinción (Text) de una serie de descargas sucesivas.
7. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 5, caracterizado porque mantiene o regula el valor (Id) de la corriente al inicio del periodo de extinción (Text) de manera que se establece una velocidad de extinciones espontáneas (TXn) preferiblemente próxima al 100%.
- 40 8. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 6, caracterizado porque mantiene o regula el valor (Id) de la corriente en el inicio del periodo de extinción (Text) de manera que se establece una duración media (Mtext) de descargas que han terminado en extinción espontánea alrededor de un valor predeterminado favorable al proceso.



**Fig.1**

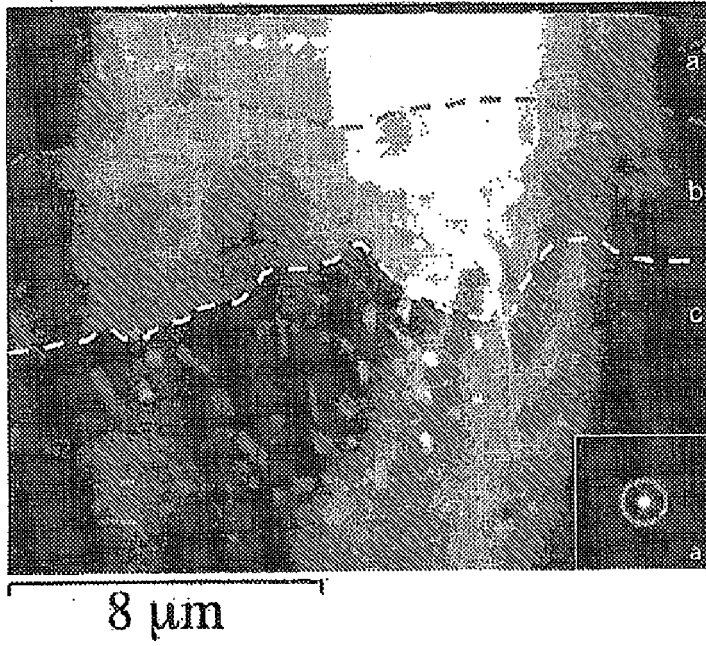


FIG. 2A

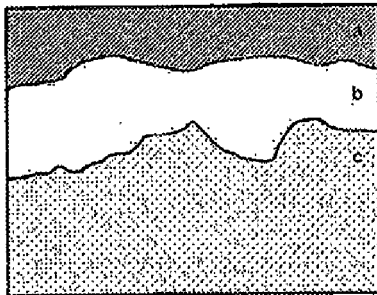


FIG. 2B

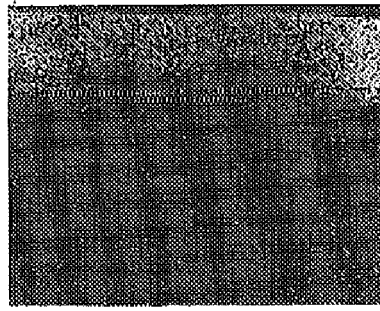


FIG. 2C

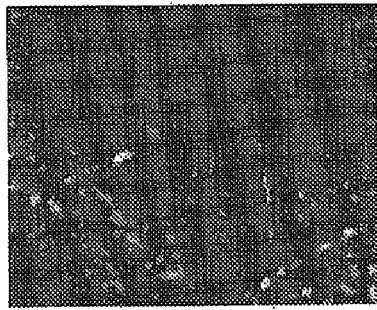


FIG. 2D

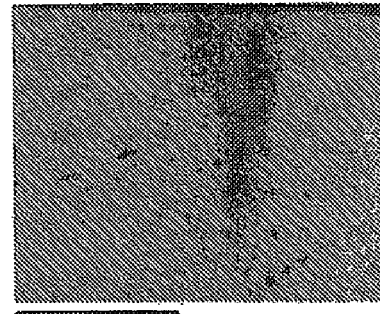


FIG. 2E

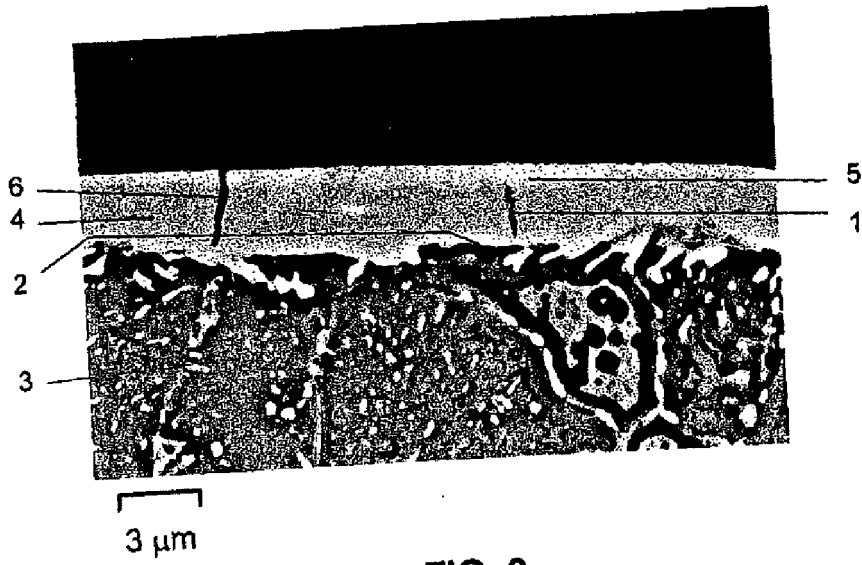


FIG. 3

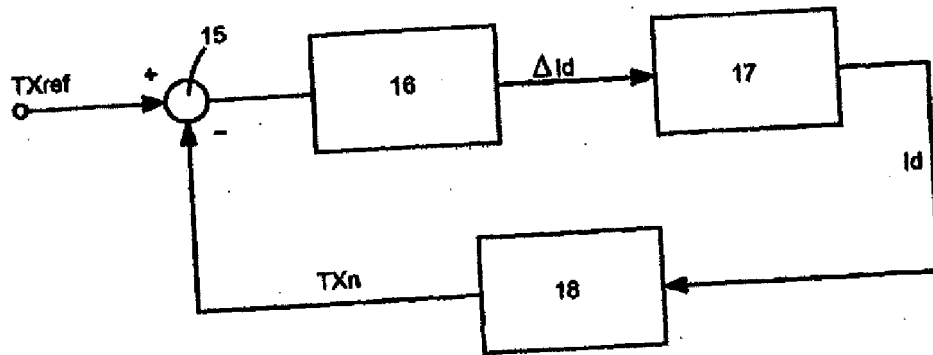


Fig.5



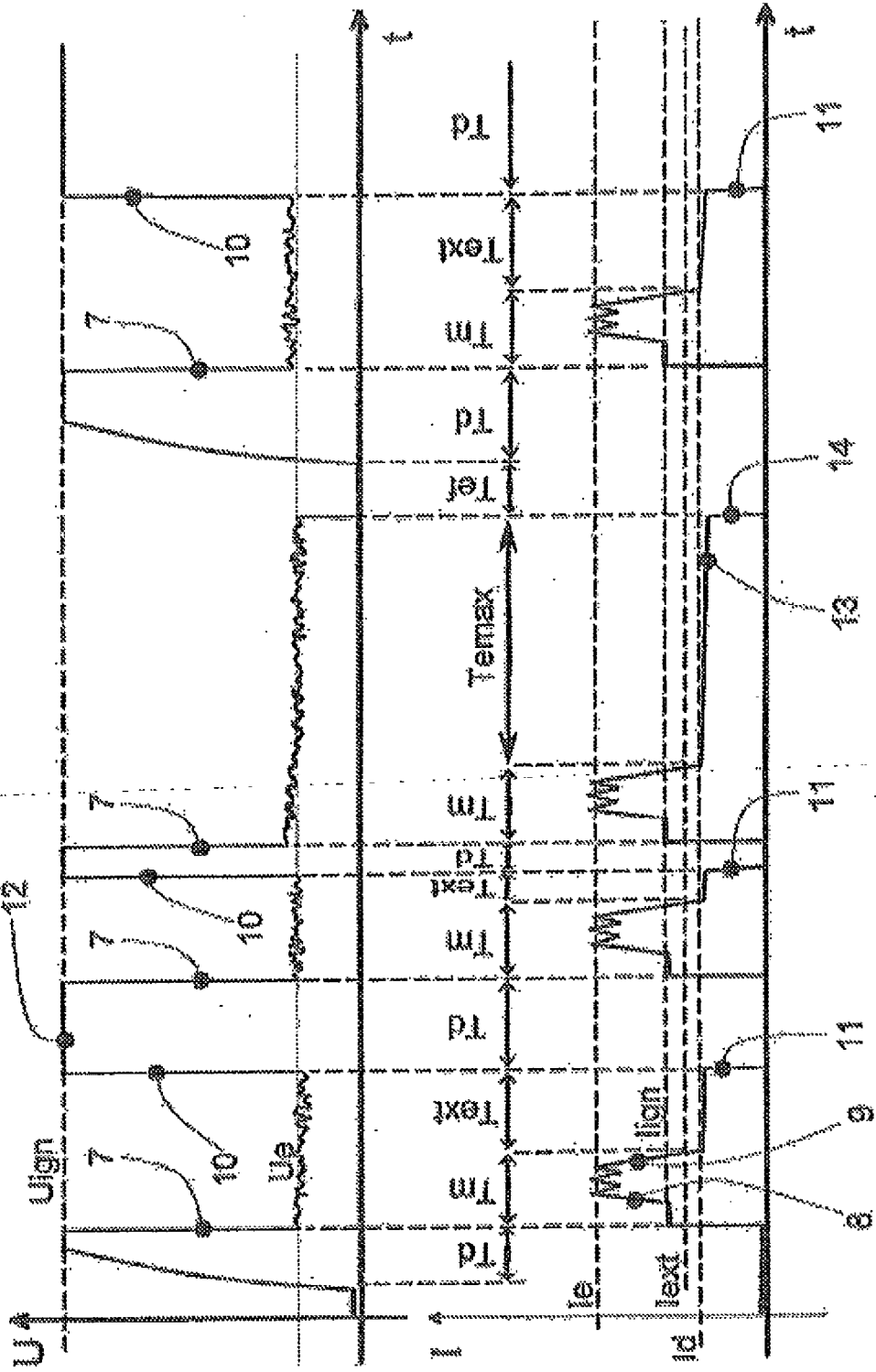


Fig.4

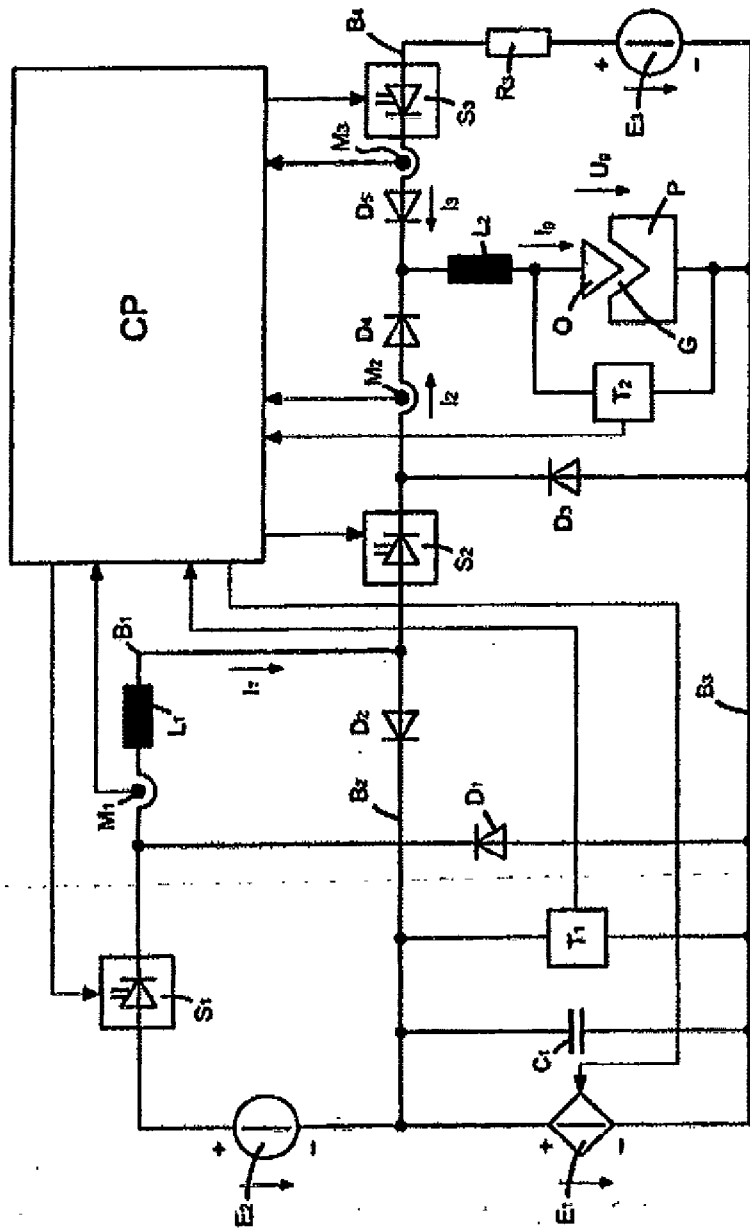


Fig.6