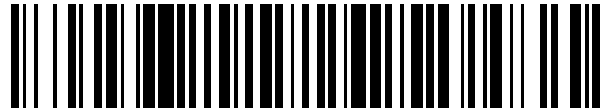


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 427 014**

51 Int. Cl.:

**B23H 7/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.01.2009 E 09001260 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.06.2013 EP 2213400**

54 Título: **Método y aparato de mecanizado por descarga eléctrica por hilo metálico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**28.10.2013**

73 Titular/es:

**AGIE CHARMILLES SA (50.0%)**  
**Via dei Pioppi 2**  
**6616 Losone, CH y**  
**CHARMILLES TECHNOLOGIES S.A. (50.0%)**

72 Inventor/es:

**ANGELELLA, STEFANO;**  
**MAZZOLINI, LIVIO y**  
**CANDOLFI, STEFANO**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 427 014 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Método y aparato de mecanizado por descarga eléctrica por hilo metálico

Campo de la invención

5 La presente invención trata de un método para controlar un proceso de mecanizado por descarga eléctrica por hilo metálico y de un aparato de mecanizado por descarga eléctrica por hilo metálico.

Tal aparato es conocido por el documento DE4222186 que describe la combinación de características del preámbulo de la reivindicación 14.

Antecedentes de la invención

10 El mecanizado por descarga eléctrica por hilo metálico (WEDM) es un proceso de mecanizado extremadamente versátil y preciso. El contorno deseado se corta en una pieza de trabajo por medio de un electrodo de cable (hilo). El hilo metálico y la pieza de trabajo se mueven en relación uno con el otro de acuerdo con las instrucciones de un programa de mecanizado. El material de la pieza de trabajo es retirado por la acción de los pulsos de descarga eléctrica aplicados entre el hilo metálico y la pieza de trabajo.

15 Las máquinas de alta calidad de WEDM consiguen una precisión en la forma por debajo de 1  $\mu\text{m}$  y una rugosidad superficial por debajo de Ra 0,05  $\mu\text{m}$ . Estos resultados se consiguen liberando pulsos de descarga de muy baja energía. La precisión total de mecanizado está determinada por la suma de todos los componentes de error. Es deseable que los errores que eran tolerables en el pasado sean de aquí en adelante tenidos en cuenta. En el mecanizado WEDM la interacción de la herramienta y la pieza de trabajo, despreciando el error de arrastre, oscilaciones del hilo, desgaste del hilo, etc., es esencialmente lineal.

20 Con ciertos materiales de la pieza de trabajo, condiciones de trabajo, etc., puede ocurrir que el hilo metálico deje algunas marcas de corte que se extienden verticalmente en la superficie mecanizada. Las marcas de corte se producen en la forma de rebabas que sobresalen y ranuras. Hay varias causas por las que se produce marcas de corte. Algunas veces las rebabas que sobresalen son debidas a faltas de homogeneidad en el material de la pieza de trabajo, en particular inclusiones, por ejemplo partículas de escoria, óxidos, etc., que son mucho menos conductoras que el material de la base.

25 Como se muestra en la Figura 1, los defectos de material locales causan rebabas protuberantes aisladas remarcables. Algunas veces, las marcas de corte están causadas por el desprendimiento súbito de virutas de abrasión, como por ejemplo el material de recubrimiento del hilo metálico comparativamente más blando, acumulado en una fuente de corriente o en una guía del hilo. Debido a estos defectos locales el hilo metálico se puede desviar lateralmente un poco, aunque lo suficiente para dejar una marca de corte en la dirección de desplazamiento del hilo. Algunas veces las marcas de corte son visibles a simple vista, y son por lo tanto muy indeseables. El paro y la reanudación del proceso de WEDM, por ejemplo en caso de un fallo de suministro eléctrico, es otra causa de marcas de corte.

30 Las condiciones de trabajo difíciles o el ajuste inapropiado son otras causas que generan marcas de corte. Aquí, en la mayoría de los casos las rebabas protuberantes y las ranuras están presentes en la totalidad de la superficie mecanizada o en un lado completo de la pieza de trabajo, tal como se muestra en la Figura 2. Estas marcas de corte son mucho más pequeñas que las rebabas protuberantes, casi siempre aisladas, causadas por un defecto de material. La energía de los pulsos de descarga es inferior en cada corte sucesivo, por lo que a veces es difícil retirar las marcas de corte con métodos convencionales.

35 El documento DE 42 22 186 C2 de BÜHLER sugiere inclinar ligeramente el hilo metálico en la dirección de corte cuando se produce cortes de acabado a lo largo de secciones rectas o ligeramente curvadas (véase también el documento US 5.438.178 del miembro familiar de BÜHLER, por ejemplo la Figura 4; descripción, columna 5, línea 67 – columna 6, línea 22; reivindicación 4). Una de las guías del hilo metálico superior o inferior se anticipa a la otra guía del hilo, lo que causa un pequeño desfase entre el recorrido de mecanizado superior e inferior. Debido a que el mecanizado WEDM se ejecuta con frecuencia en un corte principal y uno o más cortes de ajuste, el electrodo de hilo metálico es guiado a lo largo del recorrido de mecanizado bajo diversos ángulos en cortes consecutivos. De esta manera, las marcas de corte son eliminadas al menos parcialmente – se consigue un suavizado de la superficie.

40 Además, BÜHLER proporciona información acerca del desfase entre las guías del hilo metálico superior e inferior, de manera que se obtenga un buen acabado. Sin embargo, BÜHLER no describe cómo y bajo qué circunstancias el método se puede implementar en la práctica, y en particular como podría implementarse en ángulos y secciones en arco de gran curvatura.

50 Un objeto de la invención presente es proporcionar un método mejorado para controlar un proceso de mecanizado WEDM y un aparato para el mecanizado por descarga eléctrica con electrodo de hilo metálico mejorado.

Sumario de la invención

De acuerdo con un primer aspecto, la invención proporciona un método para controlar una máquina de descarga eléctrica por hilo metálico que comprende los pasos de: predefinir una desviación del contorno máxima admisible para un contorno predefinido que va a ser cortado en la pieza de trabajo; determinar una curvatura de al menos un elemento geométrico que define al menos una sección del contorno que va a ser cortado en la pieza de trabajo; calcular un desplazamiento de una guía superior y de una guía inferior del hilo metálico en base a la desviación del contorno máxima admisible predefinida y a la curvatura determinada de al menos un elemento geométrico predefinido; y establecer el desplazamiento correspondiente para al menos un elemento geométrico moviendo la guía superior en relación a la guía inferior del hilo metálico de manera que el electrodo de hilo metálico guiado por la guía superior y la guía inferior esté inclinado en una dirección de corte de la corriente de la pieza de trabajo durante el corte del elemento geométrico en la pieza de trabajo.

De acuerdo con un segundo aspecto, la invención provee un aparato para mecanizado por descarga eléctrica con hilo metálico, que comprende: un controlador para controlar el corte de un contorno que comprende al menos un elemento geométrico en una pieza de trabajo; un electrodo de hilo metálico y una guía del hilo metálico superior y una guía del hilo metálico inferior para guiar el electrodo de cable conductor, siendo controlables la guía superior del hilo metálico y la guía inferior del hilo metálico por un controlador; en el que el controlador está adaptado para realizar el método de acuerdo con el primer aspecto.

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

Breve descripción de los dibujos

Las realizaciones de la invención presente se explican por medio de ejemplos en relación con los dibujos que se acompañan, en los que:

- La Figura 1 muestra unas rebabas protuberantes en una superficie de una pieza de trabajo después del corte;
- la Figura 2 muestra una pluralidad de rebabas protuberantes y ranuras en una superficie de una pieza de trabajo tras el corte;
- la Figura 3a ilustra una realización de un método para suavizar la superficie de una pieza de trabajo;
- la Figura 3b ilustra adicionalmente el suavizado de la superficie de la Figura 3a;
- la Figura 4a ilustra las rebabas protuberantes de una superficie de una pieza de trabajo tras el corte;
- las Figuras 4b a 4d ilustran el efecto de un método de suavizado de la superficie mostrada en la Figura 4a;
- la Figura 5 ilustra una inclinación de una guía del hilo metálico y el desplazamiento resultante de las guías superior e inferior del hilo metálico;
- la Figura 6 ilustra la desviación del contorno que se produce cuando el electrodo de hilo metálico se inclina y se corta un contorno curvado;
- la Figura 7a ilustra una primera opción para inclinar un electrodo de hilo metálico en relación a un recorrido de mecanizado programado de acuerdo con una realización, en la que un punto de inserción superior y un punto de inserción inferior del electrodo de hilo metálico con la superficie superior e inferior de la pieza de trabajo, respectivamente, descansa en el recorrido de mecanizado;
- la Figura 7b ilustra una segunda opción para inclinar un electrodo de hilo metálico en relación a un recorrido de mecanizado programado previamente de acuerdo con una realización; en la que un punto medio del electrodo de hilo metálico que corre sobre la pieza de trabajo descansa en el recorrido de mecanizado;
- la Figura 7c ilustra una tercera opción para inclinar un electrodo de hilo metálico en relación con un recorrido de mecanizado programado previamente de acuerdo con una realización; en la que la inclinación del electrodo de hilo metálico descansa entre los dos extremos de la Figura 7a y 7b;
- la Figura 8 ilustra una variación de la inclinación del electrodo conductor en una sección del extremo de un elemento geométrico del contorno que va a ser cortado;
- la Figura 9 ilustra la variación de la inclinación del electrodo de hilo metálico tras dejar el recorrido de mecanizado;
- la Figura 10 ilustra un contorno con seis elementos geométricos;
- la Figura 11a ilustra el contorno de la Figura 10 y los movimientos en arco circular en la transición entre los elementos geométricos;

las Figuras 11b a 11d ilustran varios movimientos de bucle en la transición entre los elementos geométricos;

las Figuras 12a a 12d explican el cálculo de los desplazamientos con más detalle;

la Figura 13a ilustra el reajuste de la inclinación del electrodo de hilo metálico en cada transición entre dos elementos geométricos;

5 la Figura 13b ilustra un método de acuerdo con una realización, en el que el desplazamiento se establece para cada elemento geométrico hasta un desplazamiento máximo;

la Figura 13c ilustra un método de acuerdo con una realización, en el que el desplazamiento se establece para el desplazamiento mínimo de un elemento geométrico;

10 la Figura 14 ilustra el proceso para inclinar el electrodo de hilo metálico moviendo las guías del hilo metálico superior e inferior a una velocidad diferente sobre una cierta distancia;

la Figura 15 muestra una distancia de separación de trabajo;

la Figura 16 ilustra un corte superior; y

la Figura 17 ilustra un aparato para el mecanizado por descarga eléctrica con un hilo metálico de acuerdo con una realización de la invención presente.

15 Descripción detallada de las realizaciones

La Figura 17 ilustra una realización del aparato para mecanizado por descarga eléctrica por hilo metálico. Antes de seguir con la descripción detallada de la Figura 17, sin embargo, se discutirán unos pocos puntos generales.

20 Como se ha mencionado ya en la parte de introducción, el documento de la técnica anterior BÜHLER no describe cómo se puede realizar la inclinación del electrodo de hilo metálico y el consecuente suavizado de la superficie, por ejemplo, en elementos de geometría curva de un contorno que va a ser cortado sobre una pieza de trabajo.

25 Se ha reconocido que, si las condiciones geométricas no son consideradas detenidamente, la implementación del método puede entrañar más daño que beneficio. Utilizando indiscriminadamente el método de suavizado en cualquier sección de un recorrido de mecanizado, por ejemplo de un contorno que va a ser cortado en la pieza de trabajo, puede causar errores de forma no definidos, que se producen por la desviación entre el contorno que debe ser cortado sobre la pieza de trabajo y el contorno que se cortará realmente en la pieza de trabajo. Por ejemplo, en secciones del contorno con detalles de pequeño tamaño y en secciones con ángulos afiladas, la inclinación del hilo metálico en la dirección de corte produce errores de forma inadmisibles, en particular un error de rectificado vertical.

30 Manteniendo el hilo metálico inclinado la dirección de corte dentro de una sección curva la forma vertical se hace cóncava en las curvas exteriores y convexa en las curvas interiores, respectivamente. Desde un punto de vista geométrico puro, una sección ortogonal a la dirección de corte en las secciones de recorrido curvo muestran una hipérbola en lugar de una línea recta. El error de contorno o desviación de contorno depende del radio de la sección curva y de la separación o desplazamiento entre el recorrido de mecanizado superior e inferior que se da por el ángulo de inclinación del hilo metálico.

35 En otras palabras, se ha descubierto que existe una desventaja entre el desplazamiento del recorrido de mecanizado inferior y superior y el error de contorno. Cuando se controla una máquina de descarga eléctrica mediante electrodo conductor o un proceso de mecanizado por descarga eléctrica con hilo metálico sobre una pieza de trabajo, la relación entre la inclinación del electrodo de hilo metálico para suavizar la superficie y el error de contorno resultante pueden ser ajustados para resultar "óptimos", esto es inclinación máxima admisible del electrodo de hilo metálico que produce un error de contorno o de forma admisible.

40 En algunas realizaciones, se determina al menos una desviación del contorno de un contorno predefinido que va a ser cortado en una pieza de trabajo. Como se ha mencionado anteriormente, la desviación del contorno (o error de contorno / forma) es la desviación entre el contorno que debe ser cortado en la pieza de trabajo y el contorno que se corta realmente en la pieza de trabajo. Esta desviación del contorno se produce por la inclinación del electrodo de hilo metálico y es la desviación con respecto al contorno que sería cortado en el caso de un electrodo no inclinado, esto es vertical. Esta desviación (admisible) puede ser predefinida, por ejemplo, por el usuario. Se pueden producir otros errores por una desviación de contorno adicional, como por ejemplo los errores que tienen su origen en el control de otros parámetros del electrodo de hilo metálico, por ejemplo voltaje de ignición, corriente de descarga, etc.

50 El contorno que debe ser cortado en una pieza de trabajo comprende al menos un elemento geométrico. Un elemento geométrico es una sección del contorno con una cierta forma, por ejemplo una recta, un arco, un ángulo, etc.

A continuación, se define una curvatura de al menos un elemento geométrico que define al menos una sección del contorno que va a ser cortado en la pieza de trabajo. Así, en este punto se conoce la información para determinar la inclinación "óptima": el error de contorno admisible y la curvatura del elemento geométrico.

5 A continuación, se calcula un desplazamiento de una guía superior y de una guía inferior del hilo metálico en base a la desviación de contorno predefinida y a la curvatura de al menos un elemento geométrico predefinido. Desplazando las guías del hilo metálico superior e inferior, se inclina el electrodo de hilo metálico, esto es, se mueve alejándose de su dirección vertical y el hilo metálico del electrodo crea una inclinación o un ángulo de inclinación con respecto a su posición vertical. Por ejemplo, las guías del hilo metálico superior e inferior se colocan por encima y por debajo de la pieza de trabajo, respectivamente, y guían el electrodo de hilo metálico a lo largo de su recorrido a través de la pieza de trabajo. El desplazamiento se establece moviendo la guía superior en relación con la guía inferior del hilo metálico de manera que el electrodo de hilo metálico guiado por las guías del hilo metálico superior e inferior esté inclinado en una dirección de corte actual de la pieza de trabajo durante el corte del elemento geométrico sobre la pieza de trabajo. El movimiento relativo entre las guías del hilo metálico superior e inferior puede ser realizado, por ejemplo, moviendo las guías del hilo metálico superior, la guía del hilo metálico inferior o ambas guías del hilo metálico superior e inferior.

10 Inclinando el hilo metálico (electrodo) en la dirección de corte se puede conseguir el suavizado de la superficie de corte de la pieza de trabajo. El suavizado de las marcas de corte, como por ejemplo las rebabas protuberantes u otras estructuras protuberantes que sobresalen de la superficie de la pieza de trabajo, se incrementa con una inclinación del electrodo de hilo metálico, ya que debido a la inclinación del hilo metálico el tiempo de contacto entre el electrodo de hilo metálico y la marca de corte se alarga. Así, el electrodo de hilo metálico se une a las marcas de corte durante un tiempo más largo y, en consecuencia, se incrementa el suavizado de las marcas de corte.

20 Por ejemplo, el hilo metálico se puede inclinar a un ángulo  $\gamma$  moviendo la guía del hilo metálico superior ( $WG_U$ ) y la guía del hilo metálico inferior ( $WG_L$ ) en relación una con la otra de manera que se produzca un desplazamiento ( $s$ ) a nivel de la pieza de trabajo. Esto se consigue, por ejemplo, manteniendo la guía del hilo metálico inferior  $WG_L$  estacionaria mientras se mueve una tabla cruzada  $X / Y$  que soporta la pieza de trabajo y moviendo la guía del hilo metálico superior por medio de una tabla cruzada  $U / V$ .

25 En general, el plano  $X / Y$  es esencialmente paralelo a la superficie  $X / Y$  de la tierra y la tabla cruzada  $X / Y$  está adaptada para mover la pieza de trabajo, que está montada sobre ella, dentro de este plano  $X / Y$ . La tabla cruzada  $U / V$  está adaptada, por ejemplo, para mover la guía del hilo metálico superior relativamente a la guía del hilo metálico inferior de manera que el hilo metálico pueda ser inclinado en diferentes direcciones, como por ejemplo paralela a la dirección de corte o también en un ángulo con respecto a la dirección de corte.

30 Un punto superior ( $P_U$ ) y un punto inferior ( $P_L$ ) son, por ejemplo, los puntos de intersección de los ejes del hilo metálico con la superficie superior e inferior de la pieza de trabajo, respectivamente. El desplazamiento  $s$  puede ser definido como el segmento proyectado en el plano  $X / Y$  de la distancia entre tal punto superior  $P_U$  y el punto inferior  $P_L$ . Así, en este caso el desplazamiento depende también de la altura (espesor) de la pieza de trabajo.

35 En suma, el desplazamiento puede ser medido en diferentes puntos: por ejemplo, puede ser definido como el desplazamiento entre las guías del hilo metálico superior e inferior o puede ser definido como la proyección del segmento en el plano  $X / Y$  de la distancia entre los puntos de inserción superior e inferior mencionados anteriormente. Sin embargo, ambos desplazamientos se establecen moviendo las guías superior y / o inferior del hilo metálico relativamente entre sí y ambos desplazamientos pueden ser convertidos fácilmente entre sí, ya que son proporcionales entre sí. En otras palabras, ambos desplazamientos son "intercambiables" y en lo que sigue no se hace diferencia entre ambos.

40 Cuando se activa el suavizado de la superficie, por ejemplo, una unidad de control de un aparato de mecanizado por descarga eléctrica inclina el hilo metálico en la dirección de corte de acuerdo con varias reglas, tal como se describirá más adelante. El hilo metálico que inicialmente estaba vertical se inclina en la dirección de corte del hilo metálico hasta el ángulo de inclinación máximo permitido y se mantiene en dicho ángulo, siempre que la curvatura de los elementos geométricos sucesivos no imponga una reducción de la inclinación o el retorno del hilo metálico a la posición vertical. La inclinación del hilo metálico se puede cambiar, por ejemplo, moviendo las guías del hilo metálico superior e inferior ( $WG_U$ ,  $WG_L$ ) a diferentes velocidades durante el corte. Por ejemplo, las guías del hilo metálico se mueven de manera que la velocidad del recorrido sobre la superficie superior sea mayor que la velocidad del recorrido sobre la superficie inferior de la pieza de trabajo en algunas realizaciones.

45 El método para suavizar la superficie se utiliza generalmente en algunas realizaciones en los pasos de mecanizado de acabado, y puede por ejemplo comprender uno o más cortes de ajuste con varios ángulos de inclinación y / o direcciones de corte. Sin embargo, el método para suavizar la superficie puede haber sido utilizado en el corte principal.

55 Los experimentos han mostrado que una inclinación comparativamente pequeña del hilo metálico en el orden de  $0,5^\circ$  lleva a una reducción notable de la rugosidad en la dirección de corte del hilo metálico ( $Ra_\perp$ ). La rugosidad se puede

reducir adicionalmente con una inclinación ligeramente mayor, pero con la desventaja de la precisión de la forma, por consiguiente el ángulo de inclinación beneficioso es de alrededor de  $0,5^\circ - 1^\circ$ .

5 Es típico para un WEDM que la rugosidad en la dirección de corte del hilo metálico ( $Ra_{\perp}$ ) es menor que la rugosidad en la dirección de alimentación del hilo metálico ( $Ra_{\parallel}$ ). En algunas realizaciones, la rugosidad en la dirección de alimentación del hilo metálico ( $Ra_{\parallel}$ ) permanece prácticamente no afectada por el método de suavizado de la superficie presente. Dado que la rugosidad en la dirección de alimentación del hilo metálico ( $Ra_{\parallel}$ ) se acerca a la rugosidad en la dirección de corte del hilo metálico ( $Ra_{\perp}$ ), la relación de  $Ra_{\parallel} / Ra_{\perp}$  se ve incrementada en algunas realizaciones. De esta manera la topografía típica de WEDM puede ser incluso menos aparente.

10 Para evitar que la desviación del contorno exceda un valor específico el desplazamiento calculado se compara con un desplazamiento máximo predefinido. En el caso de que el desplazamiento calculado sea mayor que el desplazamiento máximo permitido, el desplazamiento se establece igual al desplazamiento máximo.

15 En algunas realizaciones, se calcula un desplazamiento máximo para un elemento geométrico actual en base a una desviación del contorno predefinida y de la curvatura del elemento geométrico actual. Como se ha mencionado anteriormente, el desplazamiento se consigue moviendo las guías del hilo metálico superior e inferior relativamente entre sí. Este movimiento puede ser realizado antes de cortar un elemento geométrico actual o durante el corte de un elemento geométrico actual. Calculando el desplazamiento máximo es posible, para establecer este desplazamiento máximo antes de cortar el elemento geométrico actual y, por ejemplo, para mantenerlo constante hasta que se complete el corte del elemento geométrico actual.

20 El elemento geométrico puede ser además dividido en secciones, por ejemplo en una sección del principio o sección inicial, una sección media y una sección final. Así, el desplazamiento se puede calcular para una sección final del elemento geométrico actual. A continuación se calcula el desplazamiento máximo para el elemento geométrico siguiente. Estableciendo el desplazamiento de manera que no exceda el desplazamiento máximo para el elemento geométrico siguiente es posible una transición suave entre el elemento geométrico actual y el elemento geométrico siguiente. Como se ha mencionado anteriormente, el contorno comprende diferentes elementos geométricos que pueden ser diferentes. Así, existe una transición entre un elemento geométrico (actual) y otro elemento geométrico (siguiente). Determinando el desplazamiento (actual) para la sección final del elemento geométrico actual y el desplazamiento máximo para el desplazamiento geométrico siguiente, el desplazamiento puede ser establecido en, por ejemplo, el mismo valor.

25 Existen varias realizaciones para variar el desplazamiento en la transición desde un elemento geométrico al elemento geométrico siguiente.

30 Por ejemplo, en algunas realizaciones el desplazamiento se reduce continuamente, en una sección final del elemento geométrico, hasta el desplazamiento máximo para el elemento geométrico siguiente, en el caso de que el desplazamiento máximo para el elemento geométrico actual supere el desplazamiento máximo para el elemento geométrico siguiente.

35 En otras realizaciones, el desplazamiento se reduce a cero al final de cada elemento geométrico, esto es, en la transición de un elemento geométrico (actual) a otro (siguiente).

40 También es posible establecer un desplazamiento para dos elementos geométricos adyacentes. En este caso, no hay necesidad de variar el desplazamiento en la transición desde uno o el otro elemento geométrico. Por ejemplo, el desplazamiento se puede establecer como el menor desplazamiento máximo de al menos dos elementos geométricos adyacentes para al menos dos elementos geométricos adyacentes. Por supuesto, también es posible tener en cuenta más de dos elementos geométricos.

En algunas realizaciones el desplazamiento para el principio del elemento geométrico actual es incrementado continuamente hasta el desplazamiento máximo para el elemento geométrico actual.

45 Como se ha mencionado anteriormente, en los casos en que el radio (R) de curvatura sea muy pequeño o la curvatura (K), que es el inverso del radio de curvatura, sea muy grande, la desviación del contorno puede resultar demasiado grande. Tales condiciones pueden producirse también en elementos en ángulo, que constituyen, por ejemplo, básicamente un ángulo recto. Así, en algunas realizaciones, el desplazamiento se reduce continuamente hasta cero, en el caso de que el radio de curvatura del elemento geométrico siguiente sea igual o inferior que el radio de curvatura mínimo predefinido o en el caso de que la transición del elemento geométrico actual al elemento geométrico siguiente comprenda un elemento en ángulo.

50 Otra posibilidad es establecer el desplazamiento en la transición desde un elemento geométrico a otro elemento geométrico es insertar otro movimiento de corte o no de corte, en la transición, en la que el desplazamiento se establece como el nuevo valor para el elemento geométrico siguiente. Por ejemplo, al menos un movimiento de bucle se inserta en la transición de un elemento geométrico actual a un elemento geométrico siguiente y el desplazamiento para el elemento geométrico siguiente se establece durante este movimiento de bucle. El movimiento de bucle no comprende necesariamente un arco o un elemento circular, sino que puede ser triangular, o

elíptico, etc. El movimiento de bucle proporcionar la posibilidad de establecer el desplazamiento a un valor nuevo, y todas las formas para proporcionar este movimiento de bucle que establezcan esta posibilidad puede ser elegidas.

5 Como se menciona anteriormente, en algunas realizaciones el electrodo de hilo metálico que corta el contorno en la pieza de trabajo construye un punto de contorno superior ( $P_U$ ) sobre la superficie superior de la pieza de trabajo y un punto del contorno inferior ( $P_L$ ) en la superficie inferior de la pieza de trabajo. En tales realizaciones cada variación en el desplazamiento (s) puede ser ajustado por al menos uno de los movimientos de frenado y parado de la velocidad del punto de contorno superior ( $P_U$ ) y / o el punto de contorno inferior ( $P_L$ ).

10 Para mejorar aún más el suavizado de la superficie, la dirección de inclinación del electrodo de hilo metálico puede ser invertida para cortes de ajuste sucesivos en la pieza de trabajo. En algunas realizaciones al menos un corte principal de la pieza de trabajo se ejecuta sin inclinar el electrodo de hilo metálico en la dirección de corte, mientras que el electrodo de hilo metálico se inclina en cortes de acabado sucesivos.

15 En algunas realizaciones, un aparato de mecanizado por descarga eléctrica con hilo metálico comprende típicamente un controlador para controlar el corte de un contorno que comprende al menos un elemento geométrico en una pieza de trabajo y un electrodo de hilo metálico. Una guía del hilo metálico superior y una guía del hilo metálico inferior están adaptadas para guiar y para situar el electrodo de hilo metálico, por ejemplo para inclinar el electrodo de hilo metálico en la dirección de corte. El controlador controla las guías del hilo metálico inferior y superior y el controlador está adaptado también para realizar cualquiera de los métodos que se han explicado anteriormente.

20 Volviendo a la Figura 17, un aparato de mecanizado por descarga eléctrica por hilo metálico (WEDM) comprende un brazo inferior 6 y un brazo superior 7 para guiar un electrodo de hilo metálico 4. El electrodo de hilo metálico 4 recorre una pieza de trabajo 1, sujetado por un portaherramientas 10, y recorta un trabajo de corte 2. Una tabla cruzada X – Y 9 mueve la pieza de trabajo 1 en las direcciones X e Y, cortando de esta manera una forma específica en la plancha 1. Una tabla cruzada U – V 9 está adaptada para mover el electrodo de hilo metálico a través de una guía del hilo metálico superior 11 con relación a una guía de hilo metálico inferior 12. El electrodo de hilo metálico 4 se inclina moviendo la guía del hilo metálico superior 11 en la dirección U / V, por ejemplo, en la dirección de corte. Para controlar la separación correcta del electrodo de hilo metálico 4 con respecto al trabajo 2, una célula fotoeléctrica superior 14 y un fotodetector inferior 15 detectan el brillo de la descarga en las proximidades de las operaciones por encima y por debajo del trabajo 2.

30 En general, el trabajo 2 es recortado mediante uno o más cortes sucesivos, por ejemplo por un corte principal (grueso) y varios cortes de acabado (de precisión). En algunas casos, como se ha mencionado anteriormente, la superficie del trabajo 2 mostrará marcas de corte incluso después de realizar los cortes de acabado. Inclinando el electrodo de trabajo 4 con la tabla cruzada U – V 9 en la dirección de corte, la superficie del trabajo 2 se suaviza, ya que el electrodo de hilo metálico 4 suaviza las marcas de corte en un ángulo y, así, permanece más tiempo en contacto con cada marca de corte.

35 El efecto de suavizado de la superficie y los métodos para realizar el suavizado se explican con mayor detalle como sigue:

40 Inclinando ligeramente el hilo metálico en la dirección de corte en cortes sucesivos, una marca de corte generada en un primer corte no interfiere con el corte sucesivo “de inmediato”. La interferencia del hilo metálico con la marca de corte puede ser representada como la intersección de dos segmentos, esto es el hilo metálico interfiere únicamente con una parte pequeña de la marca de corte de inmediato. Así el suavizado de la superficie es debido a un efecto de nivelado. En algunas realizaciones, el suavizado de la superficie es particularmente efectivo con rebabas protuberantes, porque estas rebabas están expuestas particularmente a la acción de las descargas de chispas.

45 Las Figuras 3a y 3b muestran una pieza de trabajo que tiene unas marcas de corte, durante una operación de corte de ajuste. Para mayor simplicidad solamente se representan 3 marcas de corte. El hilo metálico es guiado por unas guías del hilo metálico superior e inferior  $WG_U$  y  $WG_L$ . El hilo metálico engrana con la marca de corte desde la parte superior a la parte inferior. En la Figura 3a el hilo metálico encuentra una marca de corte, mientras que en la Figura 3b se ha cruzado aproximadamente la mitad de una marca de corte.

50 La Figura 4a muestra la superficie de una pieza de trabajo tras un corte principal, en la que la pieza de trabajo tiene marcas de corte que se extienden verticalmente por la totalidad de la superficie. La pieza de trabajo es sometida sucesivamente a diversos cortes de ajuste con pulsos de energía progresivamente inferiores y distancias de separación de trabajo inferiores, de manera que se consiga la calidad de la superficie deseada (Figuras 4b – 4d).

55 Como se ha explicado anteriormente y se ha ilustrado en la Figura 6, en algunas realizaciones, el método de suavizado de la superficie presente implican una desviación desde el contorno predefinido, llamada error de forma  $E_S$ , en las secciones de recorrido curvo, causadas por el retraso entre las guías del hilo metálico superior e inferior. Este error de forma  $E_S$  se produce, cuando el hilo metálico se inclina en la dirección de corte, debido a que en las secciones de recorrido curvo no es posible tener el punto superior  $P_U$ , un punto inferior  $P_L$  y un punto intermedio coincidiendo todos ellos al recorrido de mecanizado nominal. El error de forma  $E_S$  es proporcional a la curvatura de un elemento geométrico y proporcional al desplazamiento s, que es, por ejemplo, el desplazamiento del punto

superior  $P_U$  y del punto inferior  $P_L$ . El radio de cada elemento geométrico se extrae del programa de mecanizado, mientras que la desviación del contorno máxima admisible  $E_{smax}$  está definido, por ejemplo por el usuario, y almacenado en una memoria de una unidad de control del aparato WGDM. La desviación del contorno máxima admisible  $E_{smax}$  se utiliza para calcular el desplazamiento  $s$  en las secciones curvas.

- 5 Para la aplicación de WEDM típica  $E_{smax}$  puede estar alrededor de  $1 \mu m$ , pero cuando se prefiere una gran precisión en la forma,  $E_{smax}$  debe estar muy por debajo de  $1 \mu m$ . La unidad de control proporciona un valor por defecto de  $E_{smax}$ , y puede estar diseñada de manera que únicamente acepte valores de entrada de  $E_{smax}$  dentro de un cierto rango, por debajo de  $3 \mu m$ . Tales valores comparativamente grandes pueden ser aceptables cuando únicamente se debe mejorar la apariencia. Alternativamente, la unidad de control puede generar automáticamente un valor permisible máximo de  $E_{smax}$  considerando el tamaño del mecanizado, el tamaño de los elementos más pequeños del contorno, (esto es, radio, tamaño del relleno, etc.) y / u otros valores de calidad objetivos.

10 En algunas realizaciones,  $E_{smax}$  especifica únicamente la desviación del contorno máxima admisible permitida en las secciones curvas por el presente método de suavizado. Se debe entender que dicho valor puede estar también deducido en base a un error de contorno permisible total  $E_{smax}$  definido por el usuario o de defecto, que abarque todas las causas de error de forma, o por otro parámetro que especifique la precisión deseada.

15 La unidad de control puede proporcionar también un valor por defecto para el ángulo de inclinación máximo  $\gamma_{smax}$  o solicitar al usuario que introduzca un valor. Dado que el ángulo de inclinación  $\gamma$  y el desplazamiento  $s$  están interrelacionados, el desplazamiento máximo  $s_{max}$  puede ser calculada en base al valor del ángulo máximo de inclinación  $\gamma_{smax}$  y en el espesor de la pieza de trabajo  $H_W$ ,

20 
$$s = \tan \gamma \times H_W$$

$$s_{max} = \tan (\gamma_{smax}) \times H_W$$

En un recorrido de mecanizado recto, esto es sin curvas, una vez que el hilo metálico se inclina en la dirección de corte ( $\gamma = \text{constante}$ , curvatura  $K = 0$ , con  $K = 1/R$  y  $R = \infty$ ) el método de suavizado presente no genera errores de forma, esto es superficies cóncavas o convexas.

- 25 El desplazamiento  $s$  debe ser reducido finalmente dentro de una sección de mecanizado recta para evitar discontinuidades en la transición desde el elemento geométrico actual al elemento geométrico sucesivo. Por ejemplo, a la vista de una esquina afilada el hilo metálico se resetea de manera que alcance la esquina en posición vertical, reajustando así el hilo metálico en la posición inicial dentro del elemento geométrico actual.

- 30 En un recorrido de mecanizado curvo (curvatura  $K \neq 0$ ), el presente método de suavizado genera un cierto error de forma  $E_S$ . Así, el desplazamiento  $s$  debe ser establecido en función del  $E_{smax}$  y en función del radio del elemento geométrico actual. Además, como se ha explicado para el caso de un mecanizado recto, el desplazamiento  $s$  es reducido eventualmente en función de la curvatura de los elementos geométricos sucesivos, de manera que se eviten discontinuidades en la transición desde el elemento geométrico actual al siguiente.

- 35 En el caso general el desplazamiento instantáneo  $s$  se calcula como una función del valor máximo del ángulo de inclinación  $\gamma_{smax}$  o del desplazamiento máximo  $s_{max}$ , así como de la curvatura  $K$  de los elementos actual y sucesivo.

- 40 En algunas realizaciones, la unidad de control proporciona un valor de defecto para el radio de suavizado mínimo  $R_{smin}$ , para excluir el método de suavizado de la superficie en las ángulos afiladas y en los radio pequeños. La unidad de control proporciona un valor por defecto  $E_{smax}$ , y puede estar diseñada de manera que acepte únicamente valores de entrada de  $E_{smin}$  dentro de un cierto rango, por ejemplo por debajo de  $5 \text{ mm}$ . Un radio de suavizado mínimo  $R_{smin}$  típico puede ser de  $1 \text{ mm}$ . Este valor podría estar definido en función del tamaño de mecanizado, o del rendimiento de la WEDM, del diámetro del hilo metálico utilizado, u otro parámetro.

- 45 Una vez que se conoce el desplazamiento  $s$ , el movimiento de las guías del hilo metálico superior e inferior  $WG_U$ ,  $WG_L$  se calculan por medio de una regla de proporción, considerando el espesor de la pieza de trabajo  $H_W$ , la distancia de la guía del hilo metálico superior  $WG_U$  desde la parte superior de la pieza de trabajo y la distancia de la guía del hilo metálico inferior  $WG_L$  con respecto a la parte inferior de la pieza de trabajo.

En lo que sigue el radio  $R$  quiere significar el radio del elemento geométrico que incluye el valor de desplazamiento. El radio del elemento geométrico está definido por el programa de mecanizado. El valor de desplazamiento, esto es la distancia (+ ó -) entre el eje del hilo metálico y la geometría deseada en la pieza de trabajo está definida en una tabla de desviaciones para cada paso de mecanizado (cortes principales y cortes de ajustes).

- 50 Hay diversas opciones realizadas en diversas realizaciones de cómo inclinar el hilo metálico en relación con el recorrido de mecanizado programado.

De acuerdo con una primera opción del método de suavizado los puntos  $P_U$  y  $P_L$  están sobre el recorrido de mecanizado (Figura 6, 7a). En este caso el desplazamiento  $s$  representa una cuerda en una sección de recorrido curvo. El mayor error de forma se corresponde con el plano de corte en el punto medio  $P_m$  entre  $P_U$  y  $P_L$ . En este



caso el desplazamiento permitido  $s$  para establecerlo dentro del máximo error de forma permitido se calcula como sigue:

$$(s/2)^2 = R^2 - (R - E_s)^2 \rightarrow s = 2 * \sqrt{(2 * R * E_s - E_s^2)}$$

5 De acuerdo con una segunda opción, un punto medio  $P_m$  entre el punto superior  $P_U$  y el punto inferior  $P_L$  está en el recorrido de mecanizado (Figura 7b). En este caso el desplazamiento  $s$  es tangente al recorrido de mecanizado y el mayor error de forma se espera en los extremos del desplazamiento  $s$ , esto es en  $P_U$  y  $P_L$ . En este caso el desplazamiento  $s$  permitido para estar dentro del máximo error de forma permitido se calcula como sigue:

$$(s/2)^2 = (R + E_s)^2 - R^2 \rightarrow s = 2 * \sqrt{(2 * R * E_s + E_s^2)}$$

10 De acuerdo con una tercera opción, ni los extremos  $P_U$  y  $P_L$  ni el punto medio  $P_m$  están en el recorrido de mecanizado programado, sino que la inclinación del hilo metálico en relación con el recorrido de mecanizado programado es tal que el error de forma en los extremos y en el punto medio son iguales (Figura 7c). De esta manera el recorrido de mecanizado programado se ajusta óptimamente. Aquí el desplazamiento permitido  $s$  que se establece para estar dentro del error de forma máximo permitido se calcula como sigue:

$$(s/2)^2 = (R + E_s)^2 - (R - E_s)^2 \rightarrow s = 2 * \sqrt{(4 * R * E_s)} = 4 * \sqrt{(R * E_s)}$$

15 El desplazamiento  $s$  calculado de acuerdo con la primera y la segunda opción es prácticamente el mismo,  $E_s^2 \ll 2 * R * E_s$ . El desplazamiento  $s$  calculado de acuerdo con la tercera opción es de alrededor de  $\sqrt{2}$  veces mayor que de acuerdo con la primera y la segunda opciones. En otras palabras, el mismo desplazamiento  $s$  causa un error de forma más pequeño, ya que el error se distribuye uniformemente a ambos lados del recorrido de mecanizado nominal.

20 Se puede seleccionar por el usuario o ser establecida automáticamente por la unidad de control una de las anteriores u otras opciones sobre cómo inclinar el hilo metálico en relación con el mecanizado programado como una función del mecanizado actual. En el caso de componentes moldeados acoplados, la matriz de extrusión y el empujador se producen de manera que se evite interferencia. Por ejemplo, todas las curvas exteriores se producen de acuerdo con la primera opción y las curvas interiores se producen de acuerdo con la segunda opción, para estar del lado de la seguridad.

25 Como se ilustra en la Figura 5 el desplazamiento  $s$  está dividido en dos partes iguales, en las que  $P_U$  anticipa  $P_m$  en  $\frac{1}{2} s$  y  $P_L$  sigue a  $\frac{1}{2} s$  por detrás de  $P_m$ , o viceversa. Dado que la distancia de la guía del hilo metálico superior  $WG_U$  a la parte superior de la pieza de trabajo y que la distancia de la guía del hilo metálico inferior  $WG_L$  a la parte inferior de la pieza de trabajo son normalmente la misma, el punto medio  $P_M$  está en a la mitad del espesor de la pieza de trabajo  $H_w$ .

30 En lo que sigue la descripción se refiere básicamente a una realización que utiliza la segunda de las opciones descrita anteriormente, esto es con un punto medio  $P_m$  del desplazamiento  $s$  ajustado con el recorrido de mecanizado programado (Figura 5 y Figura 7b).

35 Como se ha ilustrado anteriormente, en algunas realizaciones, el hilo metálico tiene que ser reajustado a la vista de ángulos y secciones en arco que tienen una curvatura grande. Sin embargo el método de suavizado de la superficie puede ser combinado con una estrategia para ángulos particular, en la que el recorrido de mecanizado es modificado selectivamente en las ángulos positivas insertando, por ejemplo, un movimiento en arco circular como se sugiere, por ejemplo en el documento JP59-115125, o insertando un bucle adyacente al recorrido de mecanizado o moviendo el hilo metálico alejándolo del recorrido de mecanizado. En lugar de reajustar el recorrido de mecanizado como se muestra en la Figura 8, el hilo metálico deja el recorrido de mecanizado original en un o más bucles, como se muestra en las Figuras 9 y 11b – 11d, de manera que uno o más elementos geométricos sucesivos pueden ser procesados con el ángulo de inclinación  $\gamma$  máximo aceptable para la sección específica. De esta manera es posible producir ángulos afiladas con un mínimo error de forma y al mismo tiempo mantener la inclinación del hilo metálico de manera que se consiga un buen suavizado de la superficie. En la sección insertada del recorrido de mecanizado, la precisión en la forma no es relevante de manera que el hilo metálico puede ser inclinado y reajustado arbitrariamente.

45 El método puede ser también utilizado sistemáticamente en cada punto de transición de elementos geométricos que tienen diferente curvatura. Por ejemplo, es posible añadir un movimiento de arco circular entre una sección recta y una sección curva, como se muestra en la Figura 11a. El ángulo  $\gamma$  de inclinación requerido se establece en la sección de arco circular. De esta manera es posible aplicar una constante de desplazamiento máximo  $s_{Emax}$  sobre la totalidad de la longitud de cada elemento geométrico.

50 Debido a que no es posible siempre aplicar el “truco” descrito anteriormente, la inclinación del hilo metálico se controla dentro de los elementos geométricos en algunas realizaciones. En algunas realizaciones, este es probablemente un aspecto delicado del método de suavizado de la superficie presente, en particular porque las guías del hilo metálico superior e inferior se mueven a velocidades diferentes para cambiar la inclinación del hilo. Así, al menos un parámetro que indique cómo cambiar la inclinación del hilo metálico se requiere en tales

realizaciones. Uno de los posibles es definir la distancia L entre  $\gamma = 0$  y  $\gamma_{smax}$  y viceversa, como se ilustra en la Figura 8. La "velocidad" de inclinación o reajuste puede ser definida introduciendo un coeficiente de variación del ángulo de inclinación  $K_\gamma$ , que representa la relación entre el desplazamiento máximo  $s_{Kmax}$  y la distancia L. De esta manera la distancia L es proporcional al desplazamiento  $s_{Kmax}$  que va a ser establecido.

5 
$$K_\gamma = s_{Kmax} / L \quad \rightarrow \quad L = s_{Kmax} / K_\gamma$$

El valor de  $K_\gamma$  es almacenado, por ejemplo, en una memoria de la unidad de control. Un valor típico de  $K_\gamma$  puede ser 0,2, de manera que, por ejemplo, en el caso de un desplazamiento  $s_{Kmax} = 100$  micrómetros la inclinación del hilo metálico o el reajuste se completa en  $L = 500$  micrómetros.

10 La siguiente realización ilustra cómo el desplazamiento s se calcula con una geometría de mecanizado específica. La realización de la Figura 10 se refiere al mecanizado de un molde compuesto de 6 elementos geométricos. La operación de WEDM comprende un corte principal y dos cortes de ajuste, mientras que los cortes de ajuste se ejecutan con el método de suavizado de la superficie presente.

15 El espesor de la pieza de trabajo  $H_W$  es 18 mm y el ángulo de inclinación máximo  $\gamma_{smax}$  es 1°.  $E_{smax}$  es 1 micrómetro y el radio de suavizado mínimo  $R_{smin}$  es 400 micrómetros. El coeficiente de variación del ángulo de inclinación  $K_\gamma$  es 0,2.

Elemento geométrico	1	2	3	4	5	6
Radio	3	$\infty$	0,5	$\infty$	0,1	$\infty$
Ángulo	90°	-	90°	-	90°	-
Longitud (mm)	4,712	3	0,785	2,4	0,157	6,4

Para conseguir la precisión de la forma deseada en esta realización, se deben aplicar al menos las siguientes reglas

- El desplazamiento s debe ser menor o igual que el desplazamiento máximo  $s_{Emax}$  de cada elemento geométrico (Figura 12b);
- 20 - El desplazamiento s al final del elemento geométrico actual  $GE_{(n)}$  debe ser inferior o igual al desplazamiento máximo  $s_{Emax}$  del elemento geométrico siguiente  $GE_{(n+1)}$  (Figura 12c, caso F1, líneas de puntos). Para cumplir con esta regla el desplazamiento s debe ser reducido lo suficientemente pronto, considerando siempre la "velocidad" de inclinación / reajuste.

25 Para explotar completamente el método de suavizado las reglas adicionales que siguen pueden ser adoptadas en las transiciones entre elementos geométricos adyacentes:

- Al comienzo del elemento geométrico actual  $GE_{(n)}$  : si el desplazamiento s al final del elemento geométrico precedente  $GE_{(n-1)}$ , es más pequeño que el desplazamiento s al principio del elemento geométrico actual  $GE_{(n)}$ , entonces continúa hacia el desplazamiento máximo  $s_{Emax}$  del elemento geométrico actual  $GE_{(n+1)}$ , (Figura 12c, caso 11);
- 30 - Al comienzo del elemento geométrico actual  $GE_{(n)}$ : si el desplazamiento s al final del elemento geométrico precedente  $GE_{(n+1)}$ , es mayor que o igual a el desplazamiento s al principio del elemento geométrico actual  $GE_{(n)}$ , entonces el desplazamiento s del elemento geométrico actual  $GE_{(n+1)}$  no se ve afectado (Figura 12c, caso 12, líneas de punto);
- 35 - Al final del elemento geométrico actual  $GE_{(n)}$ : si el desplazamiento s al principio del elemento geométrico siguiente  $GE_{(n+1)}$  es mayor que el desplazamiento s al final del elemento geométrico actual  $GE_{(n)}$ , entonces del desplazamiento s del elemento geométrico actual  $GE_{(n+1)}$  no se ve afectado (Figura 12c, caso F2);

En referencia a la Figuras 12a – 12d el cálculo del desplazamiento s en esta realización será descrito a continuación con detalle:

40 En primer lugar, el desplazamiento s está limitado por el ángulo de inclinación máximo  $\gamma_{smax}$  que ha sido establecido en 1°, de manera que el desplazamiento máximo  $s_{Kmax}$  es 314 micrómetros (Figura 12a).

*Paréntesis : excepto para las condiciones extremas descritas anteriormente (reglas), el desplazamiento máximo  $s_{Kmax}$  se aplica para todas las secciones rectas y para todas las secciones curvas que tengan un radio mayor o igual que el radio de transición  $R_{smax}$ , por ejemplo el radio al que el desplazamiento máximo  $s_{Kmax}$  genera el  $E_{smax}$ .*

45

El radio de transición  $R_{smax}$  se deduce como sigue:

$$s = 2 * \sqrt{(2*R*E_s + E_s^2)} \text{ con } E_s = E_{smax} \text{ y } s = S_{Kmax}$$

$$\rightarrow R_{Smax} = ((1/2 S_{Kmax})^2 - E_{smax}^2) / (2*E_{smax})$$

5 Así, con el ejemplo presente el radio de transición  $R_{smax}$  es 12,324 mm. Para cualquier radio  $R$  mayor o igual que  $R_{smax}$  el desplazamiento  $s$  es igual a  $S_{Kmax}$  genera un error  $E_s$  menor igual a 1 micrómetro, mientras que cualquier radio  $R$  menor de  $R_{smax}$  el desplazamiento  $s$  está limitado de manera que se produzca un error  $E_s$  igual a  $E_{smax}$  e igual a 1 micrómetro.

En segundo lugar, el desplazamiento  $s$  está limitado por la curvatura de cada elemento geométrico. (Figura 12b). el desplazamiento máximo  $S_{Emax}$  para cada elemento geométrico GE se calcula como sigue:

$$10 \quad s = 2 * \sqrt{(2*R*E_s + E_s^2)} \text{ con } R = \text{Radio de GE incluyendo el valor de desviación}$$

$$S_{Emax} = 2 * \sqrt{(2*R_E*E_s + E_s^2)}$$

15 En tercer lugar, el radio de suavizado mínimo  $R_{smin}$  tiene que ser observado. En la realización de la Figura 10 el método de suavizado de la superficie se aplica para todas las secciones curvas que tienen un radio mayor o igual de 0,4 mm, y por tanto para todos los elementos geométricos excepto para el elemento geométrico 5, porque el radio está por debajo del  $R_{smin}$ . Así, el hilo metálico no está inclinado en esta sección del recorrido de mecanizado.

Elemento geométrico	1	2	3	4	5	6
$S_{Emax}$ ( $\mu\text{m}$ )	155	$S_{Kmax}$	63	$S_{Kmax}$	0	$S_{Kmax}$

20 El desplazamiento  $s$  al final de cada elemento geométrico se reduce al desplazamiento  $s$  permitido al comienzo del elemento geométrico siguiente (Figura 12c, líneas de puntos), y en quinto lugar, el desplazamiento  $s$  al principio de cada elemento geométrico se incrementa hasta los valores límites mediante las limitaciones precedentes (Figuras 12c, líneas de puntos). La Figura 12d muestra el limite completo del desplazamiento  $s$  que va a ser establecido en función de la posición en el recorrido de mecanizado.

25 Existen otras realizaciones para controlar la inclinación del hilo metálico o el desplazamiento  $s$  en una secuencia de elementos geométricos. Por ejemplo, el hilo metálico está siempre recuperado en la transición de un elemento geométrico a otro, como se muestra en la Figura 13a. Alternativamente, es posible elegir el desplazamiento  $s$  en función del desplazamiento máximo más pequeño  $S_{Emax}$ , de manera que el hilo metálico se mantenga en la misma inclinación dentro de varios elementos geométricos, como se ilustra en la Figura 13c. Esta solución es particularmente adecuada con geometrías que tienen pocas ángulos afiladas y pocas secciones curvas con radios por debajo de  $R_{smin}$ . La desventaja de esta solución es que el ángulo de inclinación del hilo metálico no es óptimo, pero comparado con la técnica convencional los resultados del mecanizado se mejoran y la superficie puede resultar incluso más homogénea. Por comparación, el método de suavizado explicado anteriormente se muestra en la Figura 13b correspondiente.

35 Como se ha explicado anteriormente, manteniendo el hilo metálico inclinado en la dirección de corte dentro de una sección curva, la forma vertical de la pieza de trabajo se hace cóncava en las curvas exteriores y convexas en las curvas interiores, respectivamente.

40 Como es conocido, la posición del hilo metálico durante el proceso WEDM está influenciado por las fuerzas de atracción y repulsión, de manera que se produce una deflexión del hilo metálico (véase por ejemplo los documentos CH 591 919, EP 0 963 272). Las fuerzas de atracción y repulsión están influenciadas por los parámetros de mecanizado, como por ejemplo el voltaje de ignición, la corriente de descarga, las pausas de pulsos, el tiempo de retardo en la ignición, la distancia de separación de trabajo, etc.

Así, en algunas realizaciones es posible compensar al menos en parte el error causado por el método de suavizado de la superficie presente cambiando uno o más de los parámetros de mecanizado citados anteriormente en las secciones curvas. En particular, es posible cambiar los parámetros de mecanizado dentro de un elemento geométrico como una función del error de forma esperado.

45 Como se ilustra en la Figura 14, las guías del hilo metálico inferior y superior se mueven a diferentes velocidades a lo largo de una cierta distancia para inclinar el hilo metálico en la dirección de corte. Así, las velocidades de mecanizado en las superficies superior e inferior de la pieza de trabajo son diferentes. Esto implica que una cantidad mayor de material de la pieza de trabajo es retirada cuando el hilo metálico se mueve más despacio y viceversa. En otras palabras, la distancia de separación de trabajo a lo largo del espesor es proporcional a la velocidad de mecanizado, como se muestra en la Figura 15.

Aparte de que se retira una cantidad ligeramente excesiva de material, el cambio del ángulo de inclinación en la dirección de corte del hilo metálico puede causar una rebaba en el punto de transición, que se extiende sobre una parte del espesor de la pieza de trabajo. En la Figura 16, las áreas sombreadas ilustran zonas con una retirada excesiva de material, esto es un corte excesivo.

- 5 Para disminuir dicho error, en algunas realizaciones el ángulo de inclinación máximo está limitado a valores relativamente pequeños y la distancia de inclinación  $L$  se establece lo suficientemente larga (respectivamente el coeficiente de variación del ángulo de inclinación  $K_\gamma$  debe ser comparativamente pequeño).

10 Como una medida adicional, algunas realizaciones comprenden un algoritmo de compensación, en el que el recorrido del hilo metálico se cambia de manera que se evite el corte excesivo o el corte por defecto, respectivamente, en la zona de variación del ángulo de inclinación del hilo metálico. En estas zonas el corte excesivo o el corte por defecto son estimados, por ejemplo considerando las distancias de mecanizado  $L_U$  en la superficie superior y  $L_L$  en la superficie inferior, respectivamente, en relación con la distancia de mecanizado  $L_M$  a la mitad del espesor de la pieza de trabajo. En la práctica, esto significa que el hilo metálico está inclinado lateralmente, esto es normal a la dirección de corte, para compensar el error inducido por el cambio en la inclinación del hilo metálico en la dirección de corte. Un método similar para mejorar la precisión en el mecanizado por punzonado es conocido, por ejemplo, por el documento EP 1 769 871.

15 En algunas realizaciones, la unidad de control proporciona valores por defecto de los parámetros de configuración utilizados por el método de suavizado de la superficie para calcular el desplazamiento  $s$ , y en último término el recorrido de las guías del hilo metálico superior e inferior. Los valores por defecto incluyen por ejemplo  $E_{smax}$ , un ángulo de inclinación máximo  $\gamma_{smax}$  o un desplazamiento máximo  $s_{Kmax}$ , el radio mínimo de suavizado  $R_{smin}$ , un coeficiente de variación del ángulo de inclinación  $K_\gamma$ , etc. Los valores por defecto se pueden cambiar por el usuario para una aplicación específica. En algunas realizaciones, los valores por defecto están identificados automáticamente por la unidad de control adoptando algoritmos específicos, considerando los parámetros específicos de la corriente de mecanizado, por ejemplo la tipología de la geométrica (por ejemplo de estructurada a plana), la precisión esperada, el grosor de la pieza de trabajo, etc.

20 En algunas realizaciones, la invención presente se utiliza también para mejorar la calidad de la totalidad de la superficie de mecanizado de una pieza de trabajo. Sin embargo, el método de suavizado de la superficie no necesita ser activado sobre el total del recorrido de mecanizado en algunas realizaciones, sino que puede ser aplicado a una sección limitada del mismo, por ejemplo para eliminar una rebaba en la zona de entrada del corte, para mejorar la calidad de una superficie funcional, o similar.

25 Las realizaciones del método de suavizado de la superficie han sido descritas en relación a un corte denominado cilíndrico, esto es cuando la operación de corte es perpendicular al plano  $X / Y$ . Las personas versadas pueden apreciar que la invención presente puede ser utilizada también en operaciones de corte en chaflán u otras operaciones adecuadas de mecanizado por descarga eléctrica con hilo metálico.

35

**Lista de símbolos de referencia**

	Angulo de inclinación en al dirección de corte del hilo metálico	$\gamma$
	Angulo de inclinación máximo	$\gamma_{smax}$
	Desplazamiento	s
5	Desplazamiento máximo	smax
	Desplazamiento máximo de un elemento geométrico	S <sub>E</sub> max
	Desplazamiento máximo con el ángulo de inclinación máximo	S <sub>K</sub> max
	Distancia de inclinación	L
	Error de forma causado por el desplazamiento s	E <sub>s</sub>
10	Máxima desviación del contorno admisible	E <sub>s</sub> max
	Desviación total máxima admisible del contorno	E <sub>K</sub> max
	Coefficiente de variación del ángulo de inclinación	K <sub><math>\gamma</math></sub>
	Espesor de la pieza de trabajo	H <sub>W</sub>
	Radio de un elemento geométrico curvo	R
15	Radio de suavizado mínimo	R <sub>s</sub> min
	Radio de transición	R <sub>s</sub> max
	Curvatura de un elemento geométrico curvado	K
	Guía del hilo metálico superior	WG <sub>U</sub>
	Guía del hilo metálico inferior	WG <sub>L</sub>
20	Punto sobre la superficie superior de la pieza de trabajo	P <sub>U</sub>
	Punto sobre la superficie inferior de la pieza de trabajo	P <sub>L</sub>
	Punto medio entre P <sub>U</sub> y P <sub>L</sub>	P <sub>m</sub>
	Pieza de trabajo	1
	Trabajo de corte	2
25	Electrodo de hilo metálico	4
	Brazo inferior	6
	Brazo superior	7
	Tabla cruzada X - Y	8
	Tabla cruzada U - V	9
30	Soporte de trabajo	10
	Guía del hilo metálico superior	11
	Guía del hilo metálico inferior	12
	Fotodetector superior	14
	Fotodetector inferior	15

35

**REIVINDICACIONES**

- 1.- Un método para controlar una máquina de descarga eléctrica por hilo metálico que comprende los pasos de:
- predefinir una desviación del contorno máxima admisible ( $E_{smax}$ ) para un contorno predefinido que debe ser cortado sobre una pieza de trabajo;
- 5
- determinar una curvatura de al menos un elemento geométrico que define al menos una sección del contorno que va a ser cortado en la pieza de trabajo;
  - calcular un desplazamiento (s) de una guía superior ( $WG_U$ ) y de una guía del hilo metálico inferior ( $WG_L$ ) en base a la desviación del contorno máxima admisible ( $E_{smax}$ ) predefinida y a la curvatura determinada de al menos un elemento geométrico predefinido; y
- 10
- establecer para el al menos un elemento geométrico el desplazamiento correspondiente (s) moviendo la guía superior ( $WG_U$ ) en relación con la guía del hilo metálico inferior ( $WG_L$ ) de manera que el electrodo de hilo metálico guiado por las guías del hilo metálico superior ( $WG_U$ ) e inferior ( $WG_L$ ) se incline en una dirección de corte actual de la pieza de trabajo durante el corte del elemento geométrico sobre la pieza de trabajo.
- 15
- 2.- El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende, además, el paso de comparar el desplazamiento calculado (s) con un desplazamiento máximo ( $s_{max}$ ) predefinido y establecer el desplazamiento (s) igual al desplazamiento máximo ( $s_{max}$ ), en el caso de que el desplazamiento calculado (s) sea mayor que el desplazamiento máximo ( $s_{max}$ ).
- 20
- 3.- El método de acuerdo con las reivindicaciones 1 ó 2, que comprende, además, el paso de calcular un desplazamiento máximo ( $S_{Emax}$ ) para un elemento geométrico actual, en base a la desviación del contorno máxima admisible ( $E_{smax}$ ) predefinida y a la curvatura del elemento geométrico actual.
- 4.- El método de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el desplazamiento (s) se calcula para una sección final del elemento geométrico actual y el desplazamiento (s) no supera el desplazamiento máximo ( $S_{Emax}$ ) para el elemento geométrico siguiente.
- 25
- 5.- El método de acuerdo con la reivindicación 4, en el que el desplazamiento (s) es reducido continuamente, en una sección final del elemento geométrico, hasta el desplazamiento máximo ( $S_{Emax}$ ) para el elemento geométrico siguiente, en el caso de que el desplazamiento máximo ( $S_{Emax}$ ) para el elemento geométrico actual supere el desplazamiento máximo ( $s_{Emax}$ ) para el elemento geométrico siguiente.
- 30
- 6.- El método de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el desplazamiento (s) se reduce hasta cero en el final de cada elemento geométrico.
- 7.- El método de acuerdo con al reivindicación 3, en el que el desplazamiento (s) se establece como el desplazamiento máximo ( $S_{Emax}$ ) más pequeño de los de al menos dos elementos geométricos adyacentes para al menos dos elementos geométricos adyacentes.
- 35
- 8.- El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el desplazamiento (s) para el inicio del elemento geométrico actual se incrementa continuamente hasta el valor máximo del desplazamiento ( $S_{Emax}$ ) para el elemento geométrico actual.
- 40
- 9.- El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el desplazamiento (s) se reduce continuamente hasta cero, en el caso de que el radio de curvatura del elemento geométrico siguiente sea igual o inferior que el radio de curvatura mínimo ( $R_{smin}$ ) predefinido o en el caso de que la transición de un elemento geométrico actual al elemento geométrico siguiente comprenda un elemento en ángulo.
- 10.- El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además el paso de insertar al menos un movimiento en forma de bucle en la transición entre un elemento geométrico actual y el elemento geométrico siguiente y ajustar, durante el movimiento de bucle, el desplazamiento (s) para el elemento geométrico siguiente.
- 45
- 11.- El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el electrodo de hilo metálico que corta el contorno sobre la pieza de trabajo construye un punto de contorno superior ( $P_U$ ) sobre la superficie superior de la pieza de trabajo y un punto del contorno inferior ( $P_L$ ) sobre la superficie inferior de la pieza de trabajo, y en el que cada variación del desplazamiento (s) se ajusta mediante la reducción de la velocidad o parada de al menos un punto de los puntos del contorno superior ( $P_U$ ) y / o inferior ( $P_L$ ).
- 50
- 12.- El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la dirección de inclinación del electrodo de hilo metálico se invierte para cortes sucesivos en la pieza de trabajo.

13.- El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que para cada uno de al menos un elemento geométrico está predefinida una desviación del contorno máxima admisible ( $E_{smax}$ ), y el desplazamiento (s) se calcula en base a cada una de las desviaciones del contorno máximas admisibles ( $E_{smax}$ ) y a la curvatura determinada de cada uno de los elementos geométricos predefinidos correspondientes.

5 14.- Un aparato para el mecanizado por descarga eléctrica con hilo metálico, que comprende:

- un controlador para controlar el corte de un contorno que comprende al menos un elemento geométrico en una pieza de trabajo (1);

- un electrodo de hilo metálico (4) y

10 - una guía del hilo metálico superior (11) y una guía del hilo metálico inferior (12) para guiar el electrodo de hilo metálico (4), siendo controlables la guía del hilo metálico superior (11) y la guía del hilo metálico inferior (12) por el controlador;

caracterizado porque dicho controlador está adaptado para ejecutar el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13

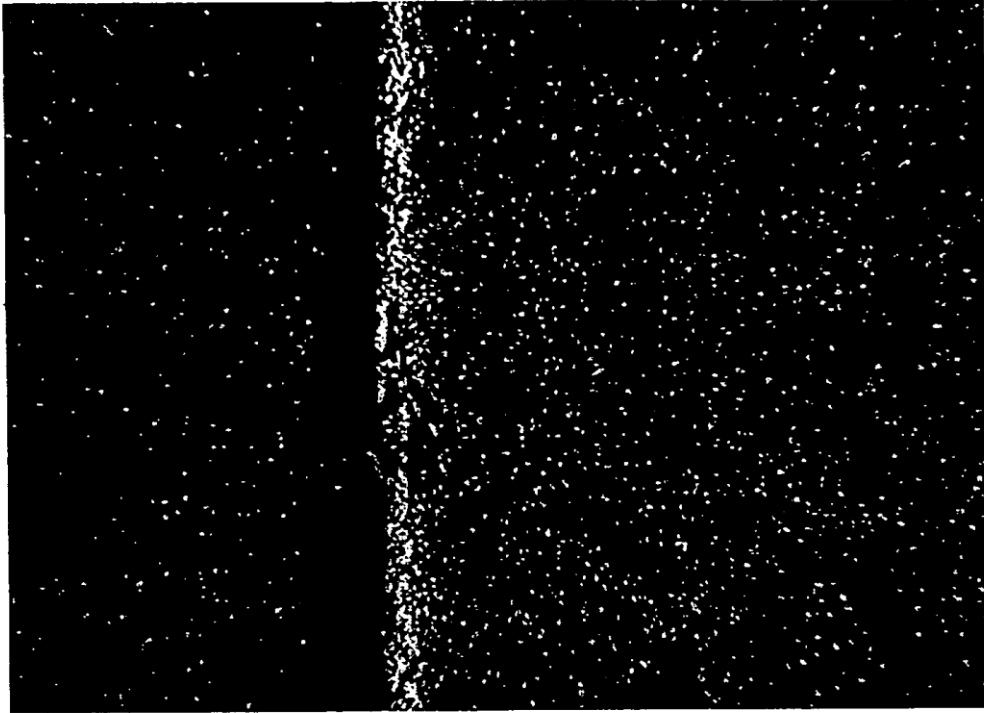


Fig. 1

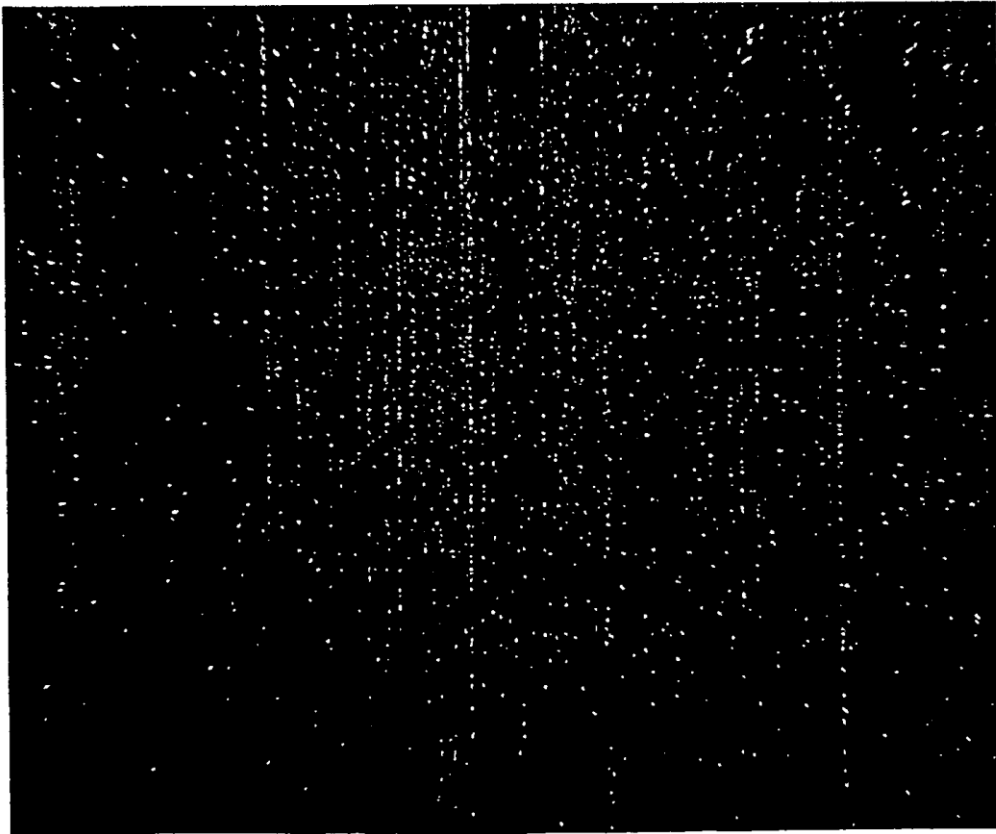


Fig. 2



Fig. 3a

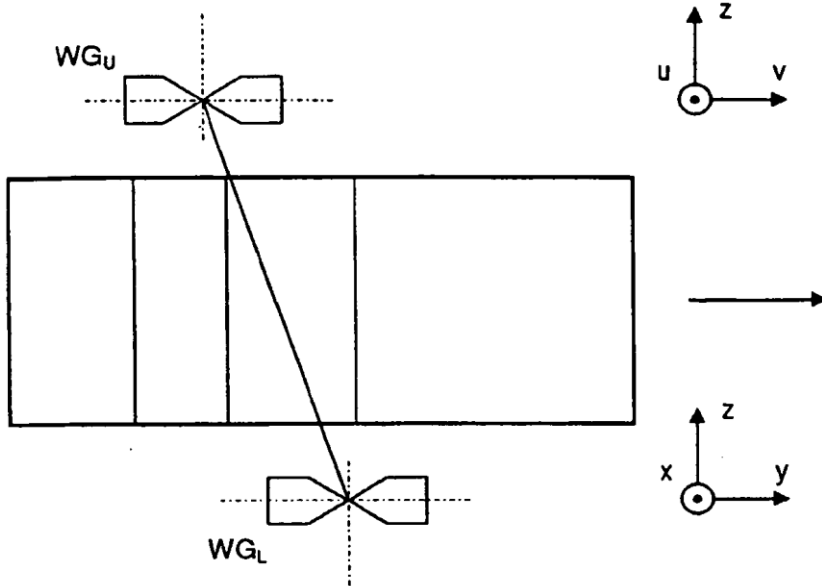
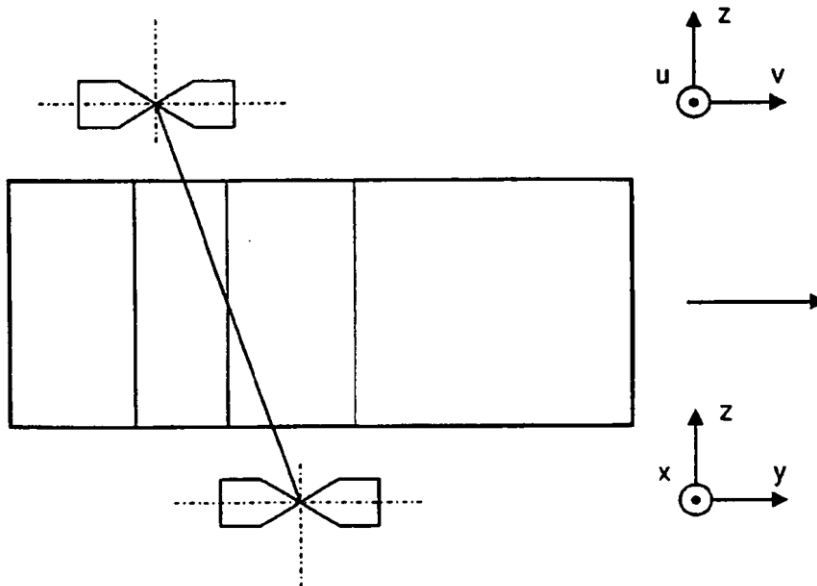


Fig. 3b



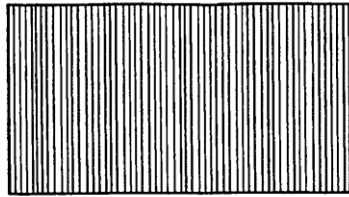


Fig. 4a

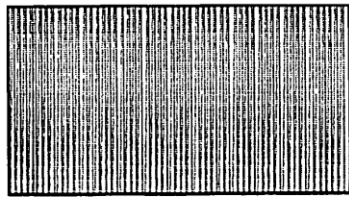


Fig. 4b

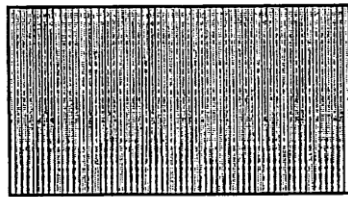


Fig. 4c

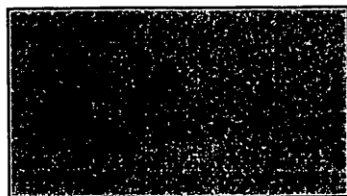


Fig. 4d

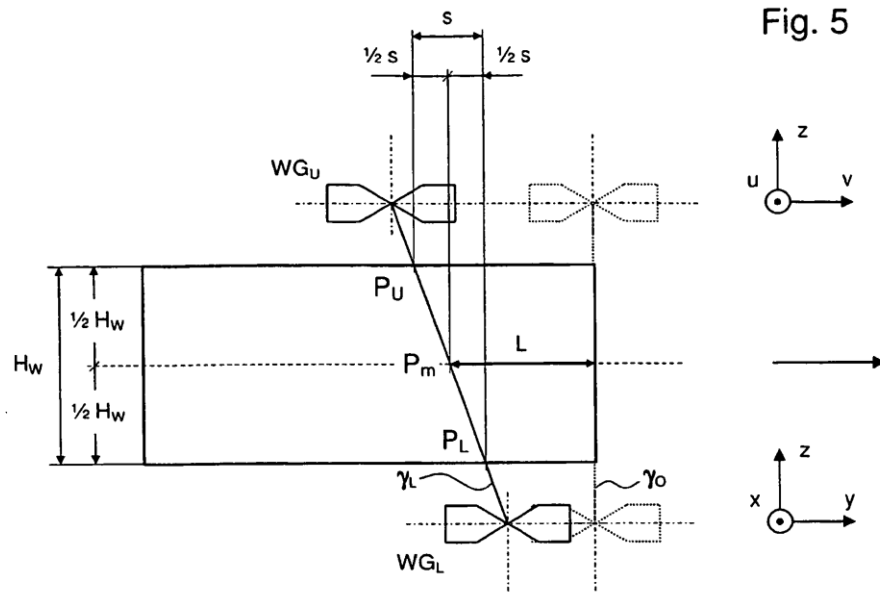


Fig. 5

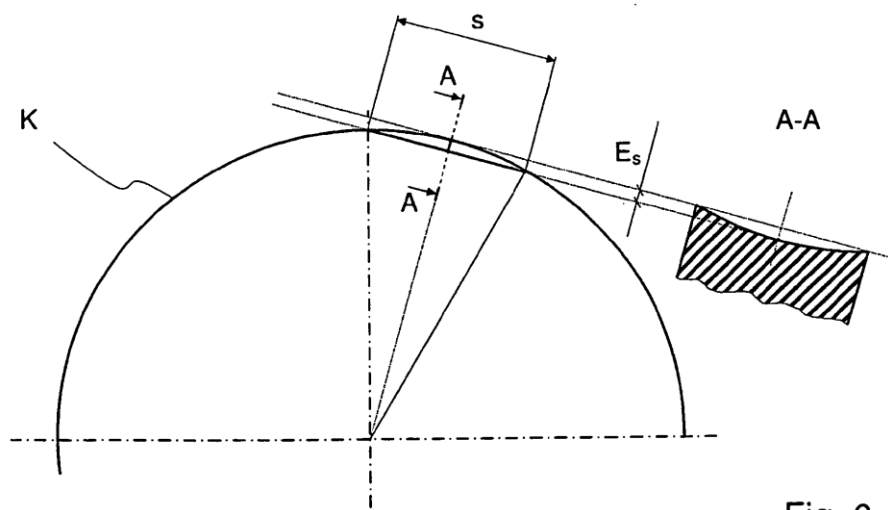


Fig. 6

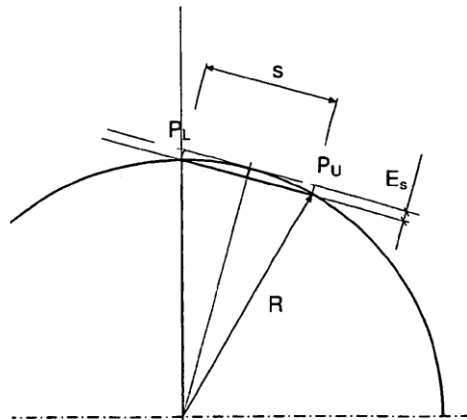


Fig. 7a

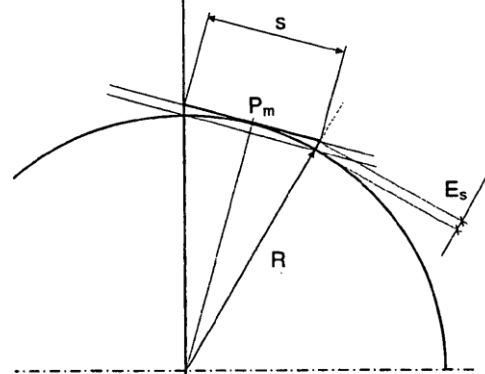


Fig. 7b

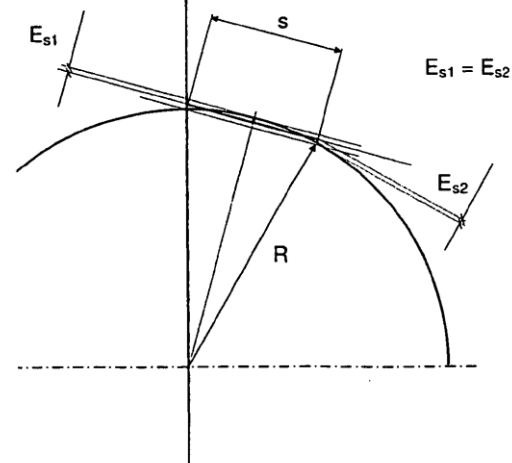


Fig. 7c

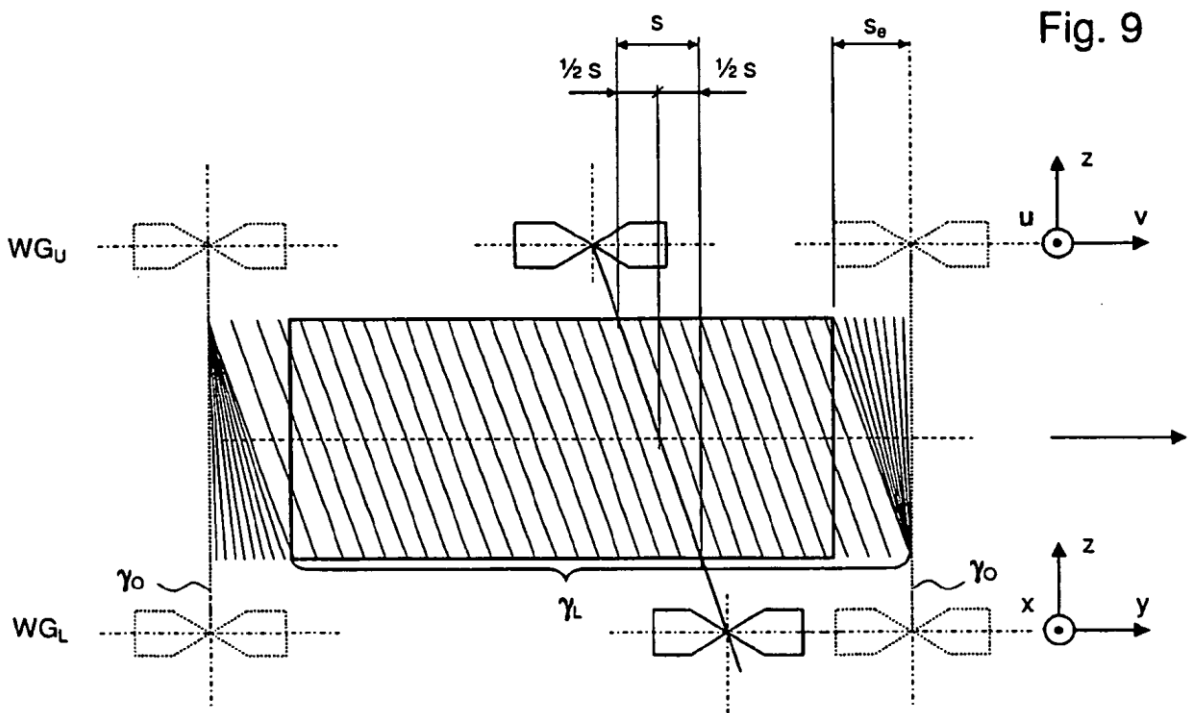
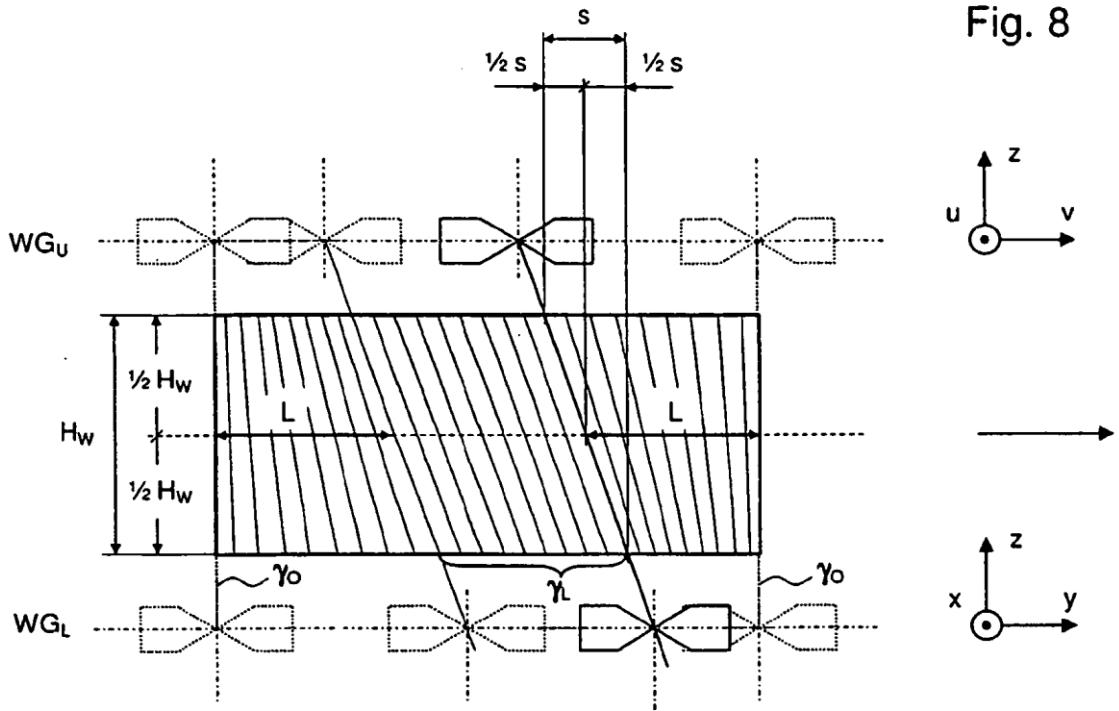


Fig. 10

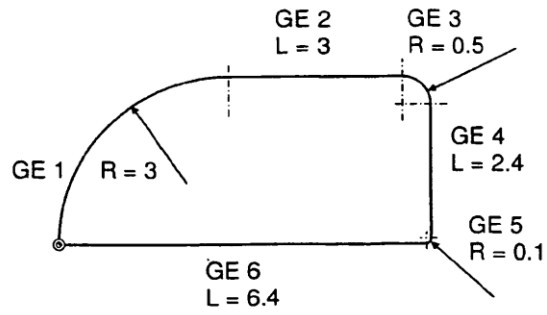


Fig. 11a

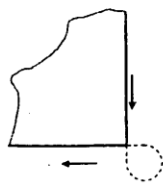
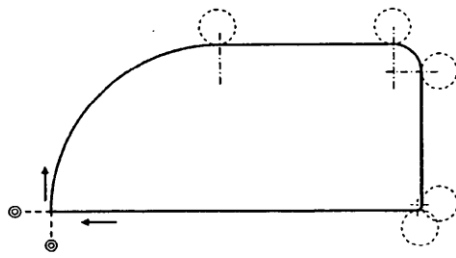


Fig. 11b

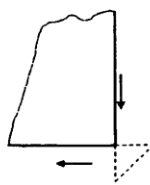


Fig. 11c

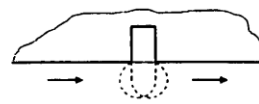
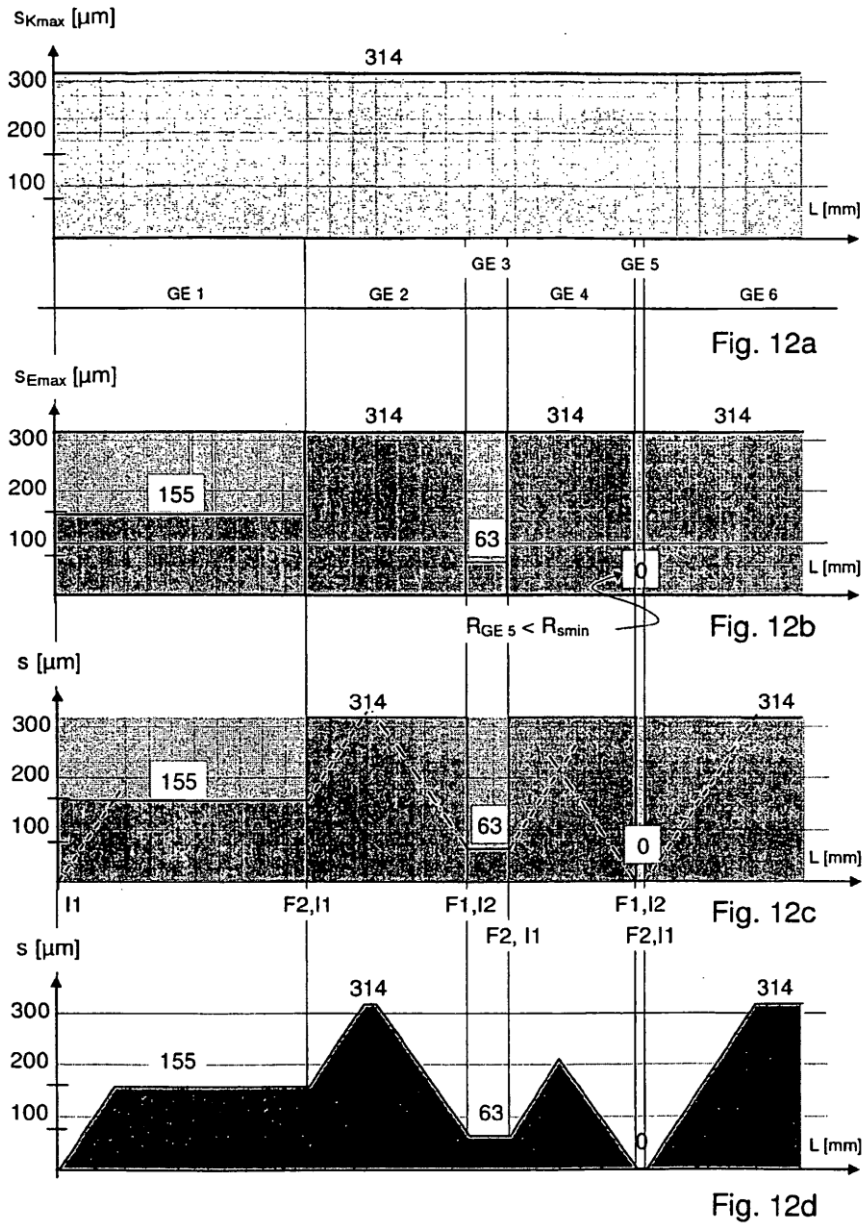


Fig. 11d



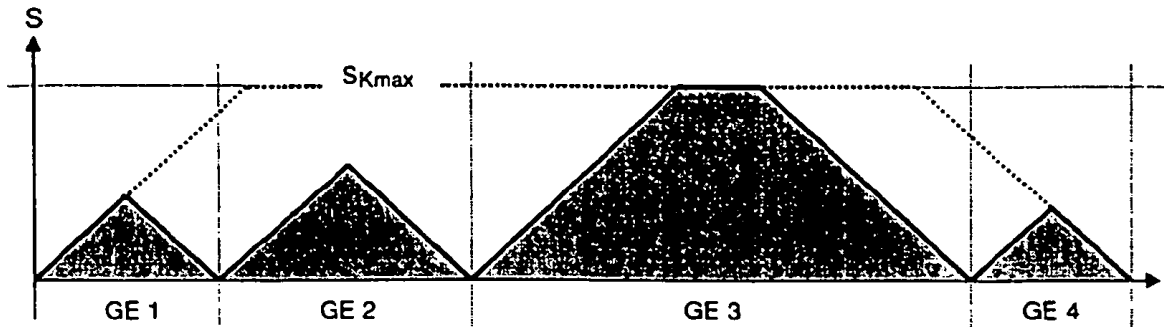


Fig. 13a

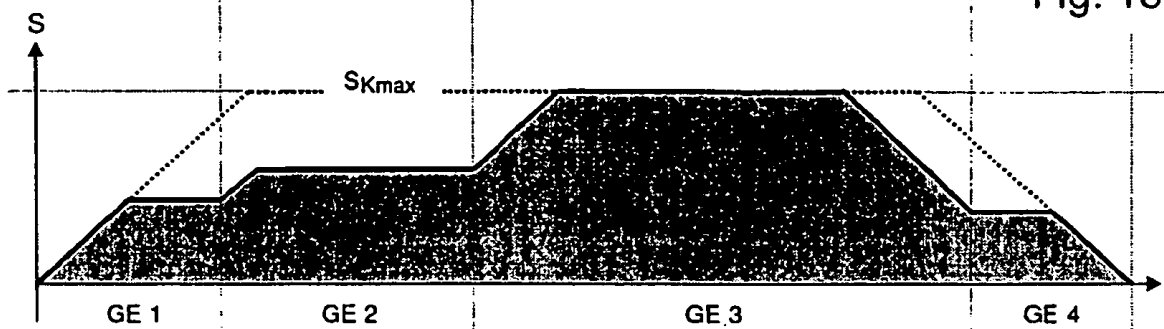


Fig. 13b

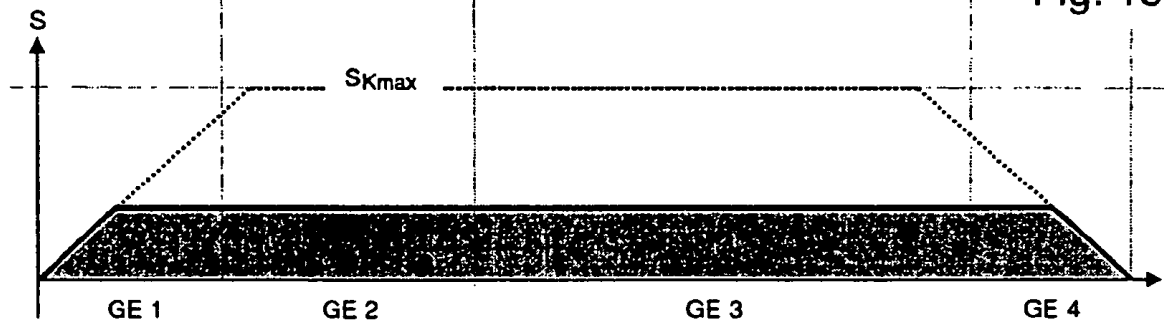


Fig. 13c



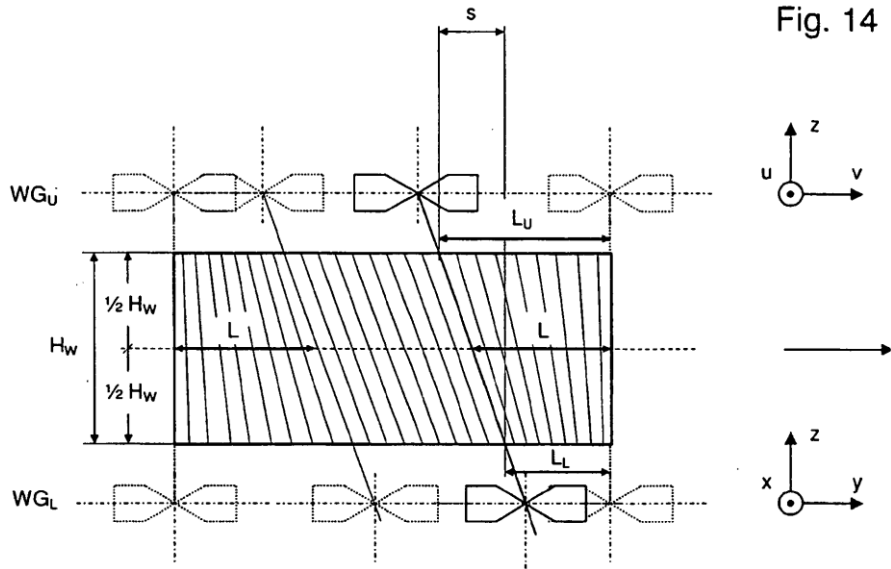


Fig. 14

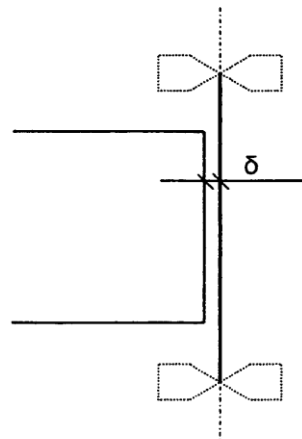


Fig. 15



Fig. 16

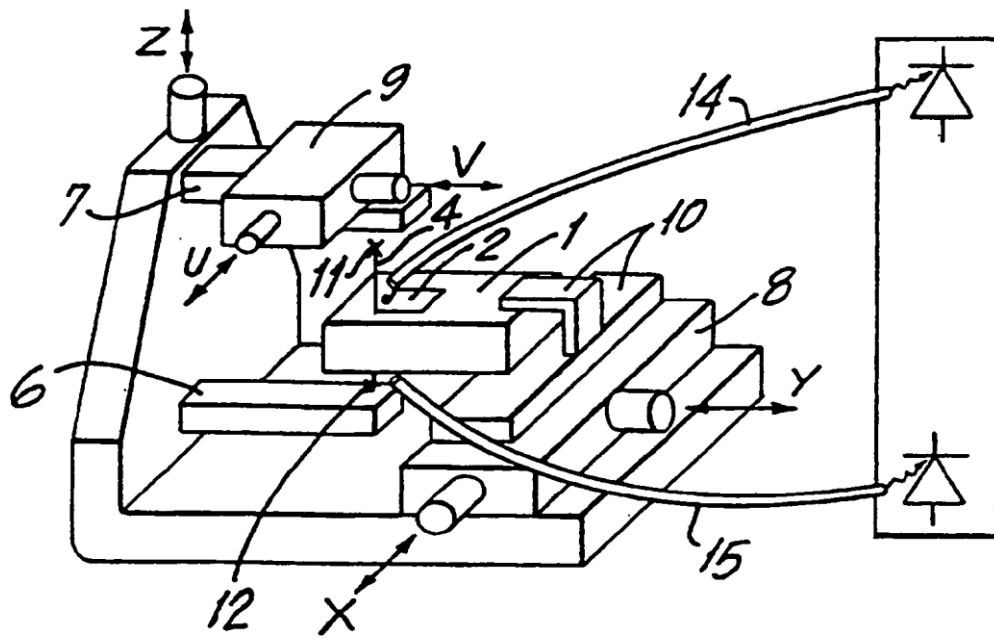


Fig. 17