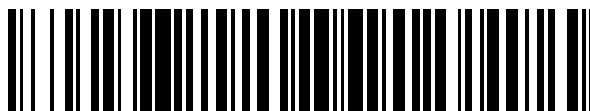


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 459 601**

51 Int. Cl.:

**B22F 3/105** (2006.01)

**B23K 26/34** (2006.01)

**B23K 26/03** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.06.1999 E 99930524 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.01.2014 EP 1099184**

54 Título: **Aparato para revestimiento por láser**

30 Prioridad:

**30.06.1998 US 107912**

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

**09.05.2014**

73 Titular/es:

**DM3D TECHNOLOGY, LLC (100.0%)  
354 Indusco Court  
Troy, MI 48083, US**

72 Inventor/es:

**MAZUMDER, JYOTI y  
KOCH, JUSTIN**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 459 601 T3

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

**DESCRIPCIÓN**

Aparato para revestimiento por láser

Campo de la invención

5 La invención se relaciona con un aparato para formar depósitos de metal fundido, denominados "coladas fundidas", sobre la superficie de una pieza de trabajo utilizando un haz de láser y una fuente de metal de deposición, típicamente un metal en polvo inyectado o un alambre de metal.

Antecedentes de la invención

10 Actualmente, una de las dificultades enfrentadas por los fabricantes es la brecha de tiempo entre el concepto y el desarrollo de una nueva tecnología y la introducción de productos reales al mercado. En la manufactura, una etapa limitante de tiempo crítica para muchos productos es el diseño y fabricación de moldes y matrices. Las matrices complejas pueden tomar desde semanas hasta un año para perfeccionarse antes de la manufactura de un producto. En los procesos de manufactura actuales, son necesarias etapas añadidas para superar las deficiencias de los métodos de fabricación actuales. Por ejemplo, para moldes y matrices, los productos deben ser maquinados para proveer canales de enfriamiento y un acabado de superficie aceptable.

15 Procesos conocidos que depositan metal dan como resultados un producto sinterizado debido al atrapamiento de óxidos y un material inadecuadamente unido. Aún en el caso donde se presenta una deposición de material aceptable, el proceso frecuentemente conlleva la formación de tensiones las cuales deben ser aliviadas. Un proceso tal conocido es el revestimiento por láser, en donde se utiliza un láser para generar una colada fundida sobre un material de sustrato mientras que un segundo material, típicamente un polvo o un alambre, es introducido, fundido y  
20 unido metalúrgicamente.

25 El revestimiento se distingue en general de la aleación sobre la base de que el revestimiento funde una cantidad relativamente pequeña del material de sustrato base con respecto a la cantidad del material depositado, y el sistema en polvo libera un volumen controlado de partículas de metal hacia este volumen fundido. Las partículas se dispersan a través de este volumen fundido y forman una deposición de una composición deseada sobre la capa externa del sustrato. El retiro del haz de láser del volumen fundido, tal como por avance de la pieza de trabajo de sustrato con respecto al punto focal del haz, hace que el volumen fundido sea enfriado rápidamente. El enfriamiento ocurre de manera tan rápida que el volumen retiene frecuentemente las características de la mezcla fundida.

30 Las técnicas de revestimiento por láser convencionales mueven el artículo metálico con respecto al punto focal mediante el uso de plantillas de posicionamiento, manipuladores de partes y similares. El punto focal del haz por lo tanto permanece fijo en el espacio, y constituye el punto de pulverización. El movimiento uniforme del artículo metálico usualmente requiere una plantilla de posicionamiento complicada la cual es difícil de manufacturar, muy costosa, y usualmente no muy exitosa, particularmente con geometrías intrincadas. Por esta razón, el revestimiento por láser de las partes metálicas que tienen geometrías diferentes a las relativamente planas ha sido casi imposible de alcanzar sobre una base uniforme consistente. Hasta el tiempo presente, no ha sido posible controlar la  
35 dimensión y propiedades del depósito. El control cercano de la dimensión es necesario con el fin de aplicar las técnicas de revestimiento básicas a la producción de partes que tienen tolerancias cerradas, microestructuras y propiedades aceptables, y que pueden ser producidas a un coste razonable y dentro de un periodo de tiempo razonable.

40 La US 5, 659,479, considerada como la técnica anterior más cercana al asunto de la reivindicación 1, describe un aparato para controlar, en tiempo real, las variables de procesamiento en un procesamiento por láser de materiales utilizando procedimientos de control de lógica difusa dentro de un controlador de lógica difusa. El aparato comprende un detector de luz visible como parte del bucle de control para detectar la luz que proviene de la zona de interacción láser-material. La luz detectada es procesada para determinar el número de píxeles de brillo por encima de un número predefinido. A partir de este procesamiento elemental, se obtienen variables de entrada al sistema, y estas variables de entrada son introducidas al controlador de lógica difusa para un paso de interferencia con la salida que está siendo utilizada para controlar una variable de procesamiento con láser tal como potencia del láser,  
45 intensidad del láser y velocidad de proceso.

50 La JP07-108389 describe un aparato para llevar a cabo el monitorio en línea de la calidad del revestimiento en el momento de formación de una cuenta de revestimiento durante el maquinado del revestimiento. La potencia de revestimiento provista a partir de una boquilla de suministro es fusionada a un miembro que va a ser revestido utilizando un haz de láser 4. La intensidad de las longitudes de onda de luz asociadas con los elementos contenidos en cada material contenida en la luz radiante generada a partir de un punto de fusión de la parte en maquinación se mide al menos por un sensor de longitud de onda de luz radiante y las dimensiones y forma de la parte en maquinación y revestimiento se obtiene mediante una parte de procesamiento de datos. Las dimensiones y datos de  
55 forma de las partes en maquinación-revestimiento son retroalimentadas a una máquina de haces de láser a partir de una parte de control de máquina de haz de láser y se controlan las condiciones de maquinación.

La presente invención es útil en controlar automáticamente la formación de material sobre un sustrato y es particularmente útil en la fabricación de partes metálicas a través de operaciones de revestimiento repetitivas como podría ser requerido para manufactura en volumen pequeño, operaciones de prototipo y similares.

5 Ampliamente, y en términos generales, se utiliza un láser para calentar localmente un punto sobre un sustrato, formando una colada fundida en la cual se alimenta polvo para crear un depósito que tiene una dimensión física. Se utilizan medios de detección óptica acoplados a un sensor optoeléctrico para monitorear una dimensión física del depósito, y un controlador de retroalimentación es operativo para ajustar el láser de acuerdo con la señal eléctrica, controlando por lo tanto la tasa de deposición del material.

10 En la realización preferida, la dimensión física es la altura del depósito, y el sistema incluye adicionalmente una interfaz hacia un sistema de diseño auxiliado por ordenador (CAD) incluyendo una descripción de un artículo que va a ser fabricado, permitiendo que el controlador de retroalimentación compare la dimensión física del depósito con la descripción y ajuste la energía del láser de acuerdo con la misma.

15 En términos de aparato específico, los medios de detección ópticos incluyen preferiblemente una máscara con apertura a través de la cual pasa la luz desde el depósito para alcanzar el sensor optoeléctrico, y el controlador de retroalimentación incluye los circuitos para ajustar el láser de acuerdo con la presencia o ausencia de la luz desde el depósito.

20 Un sistema para fabricar automáticamente un artículo de acuerdo con características únicas de la invención es un sistema de acuerdo con la reivindicación 1. En una disposición, los medios de traslación mueven la mesa de trabajo mientras que el láser y los medios de alimentación permanecen estacionarios, mientras que, en una configuración diferente, los medios de traslación mueven el láser y los medios de alimentación mientras que la mesa de trabajo permanece estacionaria. Como alternativa adicional, tanto el láser/alimentación al material como la mesa de trabajo/sustrato pueden ser movidos simultáneamente, preferiblemente bajo control de retroalimentación.

Breve descripción de los dibujos

25 La figura 1 es una vista esquemática de un sistema de deposición de metal directo que incluye un controlador de retroalimentación y un sistema CAD/CAM para producción automatizada de partes.;

la figura 2 es una vista esquemática de una boquilla de aspersión de láser que forma una colada fundida sobre un artículo de sustrato;

la figura 3 es una vista esquemática de una boquilla de aspersión de láser que forma una colada fundida sobre un artículo de sustrato, que incluye una ilustración de una porción del dispositivo de retroalimentación;

30 la figura 4 es una vista esquemática de un sistema de monitoreo óptico la cual ilustra características importantes de un controlador de retroalimentación;

la figura 5 es una vista esquemática de una colada fundida, un eje óptico, una máscara, y la orientación de un fototransistor para detección de dimensiones;

35 la figura 6 es similar a la figura 5, excepto porque la condición de detección que indica si está ocurriendo distorsión está invertida con respecto a la de la figura 5, así como lo están la máscara y la disposición de la máscara con respecto al material depositado;

la figura 7 es un diagrama de circuito eléctrico de una disposición de omisión del fototransistor;

la figura 8a es una señal de voltaje análoga para el láser antes del acondicionamiento y control por parte del sistema de retroalimentación;

40 la figura 8b muestra una caída de voltaje a través del circuito transistor como resultado de la altura de la detección del depósito;

la figura 8c es una curva que muestra la señal digitalizada del fototransistor enviada para controlar el láser;

la figura 8d muestra la señal análoga modificada enviada al láser la cual afecta la duración del pulso y la potencia resultante del láser;

45 la figura 9 ilustra un ejemplo específico de una estructura monolítica formada por revestimiento con láser sobre un sustrato;

la figura 10 es una gráfica de un patrón de surco preferidos;

la figura 11 es una vista en perspectiva de una muestra de banco de pruebas que incluye puntos de datos de manejo de tensión residual numerados propuestos por un grupo internacional de usuarios; y

la figura 12 es una ilustración de una matriz de herramienta que tiene partes de núcleo y de cavidad preparadas de acuerdo con un método que no es parte de la invención.

5 Descripción detallada de la invención

La presente invención reside en un sistema para fabricar automáticamente un artículo que comprende un aparato para monitorear y controlar la deposición de material sobre un sustrato, típicamente un metal. En particular, la invención es aplicable a procesos basados en la formación/sostenimiento de una colada fundida por calentamiento localizado con láser, y la inyección concurrente de polvo, típicamente de un metal. Los materiales del sustrato y la corriente inyectada se unen para formar un depósito. En el sistema único de la invención, al menos una dimensión del depósito es monitoreada y controlada para proveer una pieza de trabajo completa que tiene un contorno y dimensiones deseados dentro de una tolerancia corta. En particular, el tamaño del depósito es proporcional a la cantidad del segundo material inyectado en la colada fundida. El ensamblaje único de monitoreo y control de la invención comprende un controlador de retroalimentación que detecta una dimensión del depósito y varía la duración del pulso del haz de láser con base en la dimensión detectada. Preferiblemente, se detecta la altura del depósito y la potencia del haz de láser es controlada inversamente con la altura del depósito.

La presente invención combina técnicas de deposición de metal directas junto con un control de retroalimentación directo automatizado para alcanzar un producto final dentro de tolerancias cortas y que tenga propiedades metalúrgicas aceptables. La invención acopla las técnicas de deposición de metal directa (DNM) con un control efectivo para construir partes, prototipos, moldes y matrices con tolerancias cortas con geometrías complejas y buenas características metalúrgicas. La invención también provee la capacidad de acoplar una base de datos de CAD con la deposición de metal directa con lo cual puede fabricarse una parte completa con propiedades deseadas dentro de un periodo de tiempo corto, y en un sistema automatizado con intervención humana limitada.

La invención será descrita ahora con referencia a las figuras. La figura 1 es una vista esquemática de un sistema 102 de deposición de metal directa el cual incluye un controlador 104 de retroalimentación y un sistema 106 de CAD/CAM para producción automatizada de partes. Los factores considerados que afectan las dimensiones de la deposición del material, incluyen la potencia del láser, el diámetro del haz, la distribución temporal y espacial del haz, el tiempo de interacción, y la rata de flujo de polvo. Entre tales factores el monitoreo y control adecuado de la potencia tiene un efecto crítico sobre la capacidad de fabricar partes completas dentro de las tolerancias de control. De acuerdo con lo anterior, el controlador 104 de retroalimentación, coopera preferiblemente de manera directa con el controlador numérico (NC) 108 el cual, por si mismo, controla todas las funciones del sistema, incluyendo la potencia del láser.

Continuando con referencia a la figura 1, el sistema comprende una fuente 110 de láser que tiene un medio 112 de enfoque apropiado del haz. La fuente del láser está montada por encima del sustrato o pieza de trabajo con el fin de enfocar el haz sobre los mismos. El sustrato o pieza de trabajo está soportado sobre la mesa de trabajo, a través de cualquiera de un número de variedad de dispositivos que pueden ser utilizados para producir un movimiento relativo entre el sustrato de pieza de trabajo y la boquilla de aspersión del láser. El sistema incluye también una mesa de trabajo 114, una fuente de poder 116 y un enfriador 118 para enfriar el láser. Se prefiere que la fuente de láser sea una de CO<sub>2</sub> de onda continua o pulsos, YAG, o cualquier otro láser de longitud de onda que tenga una densidad de potencia suficiente para fundir el material que se va a depositar. Típicamente, se usa un láser excitado por RF o un láser de CO<sub>2</sub> de alta potencia. Preferiblemente, el haz de láser está dirigido de manera apenas perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo del sustrato.

Como se muestra en las figuras 2 y 3, el sistema incluye un ensamblaje 202 de boquilla el cual opera sobre la pieza de trabajo para aplicar una capa de revestimiento inyectando metal fundido en el haz. Los ensamblajes de láser y boquilla de esta clase están descritos en las Patentes de los Estados Unidos Nos. 5, 241,419 (Pratt, et al.); 5, 453,329 (Everett, et al); y 5,477,026 (Buongiorno). Una boquilla de aspersión de láser adecuada está disponible en Quantum Laser Corporation of Norcross, Georgia, y es como se describe en la Patente de los estados Unidos No. 4,724,299.

La boquilla de aspersión provee una salida común para el haz y el polvo de tal manera que ambos son dirigidos consistentemente al mismo punto sobre el sustrato de pieza de trabajo. En una configuración preferida, el ensamblaje de boquilla de aspersión del láser incluye un cuerpo de boquilla con las primera y segunda porciones extremas separadas, tal como se describe en la Patente de los Estados Unidos No. 4,724,299. Un paso de haz se extiende entre las porciones terminales y permite que un haz de láser pase a través de las mismas. Un alojamiento que rodea la segunda porción de extremo es espaciado desde la segunda porción de extremo de tal manera que forma un paso anular. El alojamiento tiene una abertura coaxial con el paso de haz para permitir que el haz de láser pase a través del mismo. Un sistema de suministro de polvo de revestimiento está asociado operativamente con el

paso para suministrar polvo de revestimiento al mismo de tal manera que el polvo sale de la abertura coaxial con el haz.

5 La boquilla de aspersión del láser alcanza una composición de revestimiento uniforme porque el haz sale de la boquilla sustancialmente de manera coaxial con el polvo de revestimiento, teniendo ambos el mismo punto focal. La boquilla tiene una salida común para el haz y para el polvo de tal manera que ambos son dirigidos consistentemente al mismo punto sobre el artículo. De esta manera, se alcanza un punto focal común el cual asegura una composición de revestimiento uniforme. Pueden obtenerse también resultados similares mediante una boquilla de inyección lateral, sin embargo, la boquilla de inyección lateral restringe la dirección del movimiento de revestimiento mientras que una boquilla concéntrica permite el cambio de dirección de la deposición en cualquier instante.

10 Las técnicas de revestimiento por láser convencionales mueven el artículo metálico con respecto al punto focal del haz a través del uso de plantillas de posicionamiento, manipuladores de partes y similares. El punto focal del haz permanece por lo tanto fijo en el espacio, y así lo hace la posición de la corriente de metal en polvo inyectada. El movimiento uniforme del artículo metálico requiere usualmente una plantilla de posicionamiento compleja que es difícil de fabricar, frecuentemente costosa y frecuentemente no muy exitosa, particularmente con geometrías extremadamente intrincadas. Por esta razón, el revestimiento por láser de partes metálicas que tienen geometrías intrincadas ha sido difícil de lograr en una base uniforme consistentemente. Los robots se han convertido en una pieza estándar para operar equipos en muchas plantas de metalurgia. El robot típico tiene una muñeca con cinco grados de libertad, cada uno de los cuales puede moverse con velocidad constante. El robot puede ser alimentado eléctrica, hidráulica o neumáticamente, o a través de alguna combinación de estos medios. La utilización de un robot en conjunto con un sistema de revestimiento por láser ayuda a alcanzar un revestimiento uniforme. El artículo puede permanecer fijo en el espacio y la boquilla puede por lo tanto moverse con respecto al artículo en cooperación con el movimiento del brazo del robot. Alternativamente, la boquilla puede permanecer fija y el artículo ser movido por el robot.

25 El controlador numérico 108 controla preferiblemente todos los componentes de operación del ensamblaje de la figura 1, incluyendo las condiciones de operación del láser, aceptando la dirección del ordenador 106 de CAD/CAM para construir el artículo, parte o pieza de trabajo. El controlador NC también recibe señales de control de retroalimentación desde el control de retroalimentación para ajustar la salida de potencia del láser, y adicionalmente para controlar la posición relativa de la mesa de trabajo y del ensamblaje de boquilla de aspersión del láser. Un controlador numérico tal como el utilizado en la figura 1 es obtenible de un cierto número de proveedores incluyendo 30 FANUC, Allen Bradley, IGM, etc. El sistema CAD/CAM es de un tipo convencional y puede comprender una estación de trabajo suministrada por un proveedor comercial tal como Sun Microsystems, Silicon Graphics, o Hewlett Packard. Entre las características requeridas en el software de CAD/CAM está la capacidad de generar una ruta a través del sustrato para la deposición de material. Esto hace posible ejecutar la formación rápida de prototipos y formar un objeto tridimensional sólido directamente a partir de dimensiones de CAD, incluyendo la producción de 35 prototipos metálicos directos utilizando la boquilla de aspersión por láser.

Como se ve mejor en las figuras 2 y 3, la boquilla 202 de aspersión del láser forma una colada fundida 204 sobre un artículo de sustrato 206. El polvo se inyecta preferiblemente a través de una boquilla 208 alrededor del haz de láser 204. Es preferible que la proyección del haz de láser sobre la superficie del sustrato no sea un perfil Gaussiano. Se prefiere que la proyección del haz de láser sea relativamente de una forma de "dona" presentando en general 40 periféricamente una intensidad máxima. Así, en contraste con un perfil Gaussiano, el punto medio del perfil del haz tiene una intensidad inferior. Esto provee una colada fundida de distribución de temperatura relativamente uniforme. Sin embargo, otras distribuciones espaciales del haz de láser pueden ser adaptadas para el proceso.

45 La figura 3 muestra una vista esquemática de un sistema de deposición de metal directa que incluye un dispositivo de control de retroalimentación 302. La energía liberada desde el láser es mostrada mediante una flecha larga, y una flecha pequeña muestra la potencia que está haciendo suministrada al sistema de suministro de polvo. El agua enfriada a 306 se muestra siendo suministrada a la salida de la boquilla de aspersión de láser. La unidad 302 de retroalimentación está dispuesta preferiblemente de manera directamente adyacente al punto en donde el láser y el polvo son incidentes sobre la superficie de la pieza de trabajo 310.

50 La figura 4 es una vista esquemática de un sistema de monitoreo óptico que ilustra la física fundamental del sistema de control de retroalimentación. En términos amplios, una dimensión tal como la altura de una colada fundida para revestimiento por láser se monitorea ópticamente y se controla electrónicamente. La superficie fundida a alta temperatura de la colada fundida emite con intensidad en la región infrarroja. La figura de barra de la figura 4 representa esquemáticamente una colada fundida. Un filtro 410 de paso de banda estrecho, preferiblemente en el infrarrojo, se coloca al frente de un lente de cámara 412. La cámara de ejemplo comprende una longitud focal de 55 135 mm con el único requerimiento de ser una magnificación adecuada para la colada fundida.

La imagen pasa a través de extendedores de cilindro 416, después de lo cual una porción de la imagen (aproximadamente 10 por ciento) es reflejada en un plano focal activo de una cámara de TV 420. Nótese que la cámara no es estrictamente necesaria de acuerdo con la invención, pero permite el monitoreo por parte de un

operador humano. La imagen reflejada pasa preferiblemente a través de un filtro 422 de densidad neutra colocado entre el reflector y el plano focal activo de la cámara de TV. La porción transmisiva de la imagen óptica pasa a través del reflector y la imagen magnificada es enmascarada en un plano focal para proveer una resolución espacial. La imagen que sale de la máscara 426 pasa a través de un lente 428 y luego a un dispositivo sensible a la luz tal como un fototransistor 430.

De manera importante, el ángulo del eje óptico 440 y la magnificación de este tren óptico se disponen de tal manera que pueden distinguirse pequeños cambios en la altura del revestimiento por parte del fototransistor 430. Con referencia a las orientaciones del sistema como se muestra en las figuras 5 y 6, la luz de una altura de colada fundida definida es enmascarada de, o se le permite pasar a través de, el fototransistor. La sensibilidad entre las dos condiciones es preferiblemente menor a 0.010" (10 milésimas (10/1000") de una pulgada. Esto es, la sensibilidad umbral entre las dos condiciones es ~0.010"; la ventana de una condición "no enmascarada es ~0.100" antes de regresar a la condición enmascarada.

La figura 4 ilustra también una manera en la cual el análisis espectroscópico puede ser incorporado en la invención a través del uso de un divisor de haces o un espejo 450 parcialmente transmisor, el cual dirige una porción de la luz recibida desde el objeto hacia un elemento 460 dispersor tal como una rejilla de difracción, cuya luz puede ser colimada mediante un lente 462 y alimentar un detector 464 generando información de contenido espectral a lo largo de la línea 466. Tal información de contenido espectral puede ser utilizada para monitorear pasivamente y/o registrar datos concernientes a la composición del material de la colada fundida o de la capa de revestimiento según se desarrolla o, puede ser incorporado en un bucle de retroalimentación para alterar la operación del sistema de acuerdo con la composición del material. Por ejemplo, la constitución de la alimentación de polvo puede ser variada de acuerdo con los criterios de diseño y verificada a través del aspecto de análisis espectral para asegurar que la aleación apropiada o el cambio en la composición de material está tomando lugar.

También debería anotarse, que aunque la potencia del láser es preferiblemente la variable modificada de acuerdo con un programa almacenado, pueden utilizarse otras variables separadamente o en conjunción con la potencia del láser. Por ejemplo, la progresión del punto de láser, o el tamaño del punto del láser pueden variarse para satisfacer los criterios de diseño o, alternativamente, puede ajustarse la alimentación de material. En efecto, a través de un control apropiado del conjunto apropiado de parámetros, la remoción del material también se hace posible por parte de la invención junto con la constitución de material, permitiendo que errores o imperfecciones sean corregidos sobre la marcha, o, alternativamente, permitiendo la modificación de partes preexistentes con respecto a nuevos criterios de diseño.

La señal del fototransistor es procesada por un circuito el cual controla la potencia del láser. La mayor parte de los láseres posee la capacidad de ser controlada por una señal de voltaje análogo individual, por ejemplo 0 voltios y 12 voltios corresponderán a no potencia, y potencia total, respectivamente. Cualquier voltaje entre esos valores generará una potencia de salida correspondiente. La mayoría de los láseres pueden responder a este voltaje análogo durante un milisegundo. El fototransistor es capaz de detectar la presencia o ausencia de luz, y su conductividad varía. Por exposición a la luz la conductividad del fototransistor se incrementa, y por lo tanto la caída de voltaje a través del fototransistor disminuye. Como se muestra en la figura 7, el valor de "R1" puede ser escogido para ajustar la sensibilidad apropiada de tal manera que  $V_{PT} + V_{salida} = 5$  voltios. En este ejemplo en particular, 5 voltios proveerán 50 por ciento de la potencia total si la potencia total se obtiene con una señal de 10 voltios.

Con referencia a la figura 5, se muestra una vista esquemática de un depósito 502 fundido con una máscara 504 dispuesta entre el depósito y el fototransistor 506. Otros elementos del sistema han sido eliminados en pro de la claridad. Como puede verse, la máscara está en forma plana y es un sólido con un orificio a través de la cual la luz puede pasar. Cuando la altura del revestimiento alcanza un nivel predeterminado, la luz en la forma de la longitud de onda seleccionada desde el material del depósito pasa a través de la máscara y es incidente sobre el fototransistor, como se muestra. Por el contrario, en tanto el nivel del depósito está por debajo del orificio en la máscara, la luz no será incidente sobre el fototransistor. Esta condición, entre luz y no luz, puede ser utilizada para controlar y ajustar la operación del láser.

La condición opuesta se muestra en la figura 6, en donde, en tanto la luz es transmitida a través de la máscara, la elevación del depósito de revestimiento es aceptable; y tan pronto como se evita que la luz sea transmitida a través de la máscara, se detecta una condición inaceptable, puesto que no hay luz incidente sobre el fototransistor. A medida que la altura de la colada cambia en elevación, la imagen baja hasta que la luz comience a impactar sobre el fototransistor. A alguna altura consistente, el voltaje ( $V_{salida}$ ) alcanza una magnitud para conmutar desde "haz encendido" hasta "haz apagado".

La figura 8 es una serie de curvas que muestra la relación de señales que controlan la operación del láser, la respuesta del fototransistor a la condición de luz/no luz en la forma de una caída de voltaje, y cómo la señal de fototransistor controla la potencia del láser. En todos los casos, el eje horizontal representa el tiempo, y el eje vertical representa el voltaje. La primera curva de la figura 8 muestra una señal de voltaje análoga para el láser antes de cualquier acondicionamiento y control por el sistema de retroalimentación de la invención. La segunda de la figura 8b

muestra la caída de voltaje a través del resistor del fototransistor. Como puede verse en la primera curva, el voltaje análogo para el láser, antes de cualquier control por el sistema de retroalimentación, es consistente y no se ajusta con el tiempo. Con referencia a la segunda curva de la figura 8, se muestra la caída de voltaje a través del resistor del fototransistor de la figura 7 durante la operación de revestimiento.

5 Al comienzo del ciclo de operación, la impedancia del fototransistor es alta, significando que no está detectando la luz emitida desde la superficie fundida y transmitida a través del filtro de banda de paso estrecha selectivo. Como resultado, la caída de voltaje a través del resistor del fototransistor es relativamente baja. En la condición donde la luz es detectada, se muestra un pico que indica que la impedancia del fototransistor es relativamente baja, y la caída de voltaje a través del resistor del fototransistor también es relativamente alta. En la tercera curva de la figura 8c, el pico de caída de voltaje a través del fototransistor provee una señal que es digitalizada. La cuarta curva de la figura 8d muestra que la señal digitalizada ha modificado ahora la señal real enviada al láser y afecta la duración del pulso y la potencia resultante del láser. Como se muestra en la cuarta curva de la figura 8, el voltaje con el tiempo para el láser ha sido ajustado ahora correspondiente a la caída de voltaje del fototransistor y el envío de la longitud de onda de luz incidente monitoreada.

15 En el aspecto de retroalimentación de la invención, el fototransistor envía una señal al controlador numérico de la figura 1, el cual ajusta entonces el suministro de voltaje láser, controlando la potencia del láser, y acusando finalmente la duración del láser incidente sobre el sustrato de la pieza de trabajo. El voltaje de la señal análoga corresponde a la potencia del láser. Esto permite la deposición directa del metal y el control de la altura de cada paso, a medida que se constituye capa sobre capa del revestimiento. El sistema de retroalimentación controla así las dimensiones acumulativas de la pieza de trabajo. El controlador de retroalimentación de la invención esencialmente indica al láser que si la pieza de trabajo esta saliéndose de las dimensiones, entonces la duración del tiempo "haz encendido" para cada pulso debe ser reducida. Cuando el haz está encendido, ocurre la deposición. Si la localización particular es demasiado alta, el bucle de retroalimentación corta la potencia del láser y reduce grandemente la deposición. El control automatizado y el ajuste de la invención son críticos puesto que el ajuste manual no es efectivo.

20 Durante el uso, el sistema puede ser utilizado para depositar material, píxel por píxel. Sin el control de retroalimentación, después de varios minutos o la acumulación de varias capas la pieza de trabajo puede distorsionarse, después de lo cual el deterioro adicional de las condiciones puede llevar a distorsión y destrucción. La ventaja del sistema de control de retroalimentación es que antes de que pueda ocurrir la distorsión, el fototransistor detecta la condición de luz/no luz emitida en la longitud de onda única del material de la pieza de trabajo, y un ordenador está preprogramado para reducir la deposición hasta que el controlador de retroalimentación detecta una condición aceptable donde permite que los pulsos se extiendan hasta su cantidad completa.

### Ejemplo 1

35 Para esta investigación, un molde de acero de trabajo en caliente de cromo-molibdeno, H13, fue depositado directamente sobre sustratos de forja H13. Esta aleación, utilizada comúnmente para fusión en molde, fue analizada por su potencial, utilidad a alto volumen en la manufactura rápida de herramientas por fusión en molde. Las comparaciones de tratamiento por calor para ambos DMD y forja H13 se llevaron a cabo en las siguientes áreas: 1) dureza, ductilidad y microestructura "como revestimiento", 2) respuesta inicial a la temperatura, y 3) respuesta a la temperatura para material enfriado con aceite austenitizado (a 1010°C).

40 Para replicar un sistema comercial, se analizaron dos modos de deposición de revestimiento. Se seleccionó una tasa de deposición de metal baja, a baja potencia, puesto que este proceso corresponde a los parámetros utilizados para detalles y bordes. Se utilizó un modo de tasa de deposición de metal alta, a alta potencia puesto que esta corresponde al método utilizado para agregar material en volumen. Estas dos formas de procesamiento se denominan como revestimiento fino y grueso, respectivamente. El sistema de retroalimentación fue utilizado en el revestimiento "fino".

45 Las condiciones de operación utilizadas para revestimiento grueso consistieron de un punto de foco de 1.1 mm rastreado hasta 3.5 mm para la fabricación de una pared vertical 1-D gruesa. La potencia de láser fue de 4500 vatios y la velocidad de alimentación de polvo fue de 16 gm/minuto. El polvo fue suministrado perpendicular a la dirección de rastreo. El haz y el flujo de polvo fueron apagados al final de cada paso y se acumularon subsecuentemente capas a la vez que se trasladan 750 mm/minuto en la misma dirección. Las capas sucesivas fueron depositadas para crear una construcción de 3.5 mm, de anchura, 70 mm de altura y 120 mm de longitud sobre un sustrato de acero al carbón bajo. Durante este proceso, la temperatura del revestimiento no se midió, pero se observó la radiación visible después de depositar las primeras 5 – 10 capas. Una barra ténsil orientada perpendicularmente a la dirección de revestimiento, fue maquinada para este espécimen "como revestimiento", como se muestra en la figura 9. Durante la prueba de tensión, un extensómetro midió la tensión en la sección de medición.

55 Para el revestimiento fino, el polvo de metal y el gas de envoltura fueron suministrados concéntricamente. La colada fundida fue formada por un punto de 0.6 mm de diámetro. La velocidad del espécimen para ambos tipos de procesos

de revestimiento fue de 750 mm/minuto. La potencia del láser y la velocidad de alimentación del polvo fueron de 1000 vatios y 5 gm/minuto para el procesamiento fino. Un sistema de retroalimentación monitoreó la altura de la colada fundida a medida que el espécimen atravesaba un patrón de surco como se muestra en la figura 10. El espesor de cada capa depositada fue de 250 micrones. El patrón fue repetido para crear una losa de 90 mm de altura. Se utilizó H13 tanto para el sustrato como para el revestimiento para permitir una comparación directa entre el revestimiento por láser y el material forjado en la prosecución de los experimentos de tratamiento con calor.

El análisis de dureza y microestructura de la pieza de trabajo revestida y la forja H13, en la condición de tratamiento con calor, son muy similares. Ambos contenían martensita templada, y algunos retuvieron austenita. Después de la austenización a 1010°C durante una hora, la mayor parte de la evidencia de la estructura de solidificación dendrítica en el revestimiento había sido retirada por difusión. Sin embargo, la formación de bandas causadas por la segregación de la aleación fue evidente en el sustrato forjado. Los resultados de este análisis demuestran que la configuración de capas múltiples por revestimiento, para formar una pieza de trabajo que tenga características equivalentes a una contraparte convencional forjada, es posible.

### Ejemplo 2

El manejo de tensiones residuales y distorsión resultante es un factor crítico para el éxito de este proceso para la demostración de la capacidad de producir componentes tridimensionales. La acumulación de estrés residual es la causa mayor de ruptura durante la fabricación de componentes de herramientas de acero. Con el fin de entender la generación de la tensión, se diseñó una muestra para estimar la acumulación de tensión por capa. Esto dio como resultado una estrategia para construir capas múltiples antes de que la tensión residual acumulada pudiera producir ruptura. Después de la deposición de un número predeterminado de capas, el alivio de la tensión se llevó a cabo antes de depositar capas adicionales. Esta estrategia llevó a la fabricación exitosa de un componente IMS-T1 de tamaño completo como se muestra en la figura 11. Se cree que este es la primera vez que se fabrica este diseño de prueba de IMS-T1 en acero inoxidable para herramientas H13 por deposición directa de metal.

Los parámetros de proceso para el ejemplo 2 se dan inmediatamente a continuación:

#### 25 Muestra NSF T1

---

Material: polvo de H13

Potencia de láser: ~100W

Rata de deposición: ~5 gr/minuto

30 Espesor de la lonja: 0.01"

Tiempo de procesamiento real con láser encendido: 50 horas

Tiempo de procesamiento total: ~100 horas

Tiempo de alivio de tensión: ~24 horas (6 x 4 horas)

Tiempo total: ~124 horas

35 La muestra fabricada fue enviada a un laboratorio independiente para la medición de la tensión residual. La figura 11 también muestra los puntos donde se midió la tensión. Las localizaciones 2, 6 y 5 fueron depositadas durante la última prueba y muestran así la tensión de compresión residual, puesto que no hubo tensión aliviada. Otras localizaciones, depositadas en recorridos anteriores y subsecuentemente con tensión aliviada, mostraron tensión residual despreciable, mientras que la tensión máxima en la localización sin alivio de tensión fue de +49.4 KSI (340 MPa).

45 Las matrices de moldeo fueron preparadas por inyección con bloque enfriado de cobre de soporte y un canal de enfriamiento con agua, y se fabricó también una matriz desbastada. Estos componentes tienen una exactitud de dimensiones muy cercanas, todos con una tolerancia dimensional de unas pocas milésimas de pulgada. Estos ejemplos muestran la factibilidad del proceso DMD para fabricación exitosa de componentes tridimensionales con aleación H13. El proceso es capaz de controlar la microestructura y así las propiedades controlando cuidadosamente los parámetros del proceso. La respuesta del tratamiento por calor del componente depositado por láser y el componente de acero inoxidable H13 de forja son los mismos. En efecto, el revestimiento de H13 por láser tratado con calor es más homogéneo estructuralmente que el H13 de forja.



- 5 El sistema de la invención provee la capacidad de establecer y refinar componentes de casi cualquier geometría que pueden ser producidos a partir de bases de datos de ordenador. Hay muchas aplicaciones importantes. Una es la creación de prototipos/manufactura rápida, lo cual permite tiempos de retorno mucho más rápidos de prototipos o herramientas de manufactura. Otra aplicación es la producción de partes en bajo volúmenes específicas para un usuario, en donde una pequeña cantidad puede ser producida de una manera efectiva en costes. Esto es particularmente ventajoso para la fabricación de dispositivos médicos, tales como partes de prótesis artificiales para individuos. Otras aplicaciones potenciales incluyen moldes para la inyección/fabricación de polímeros, insertos para moldes de fundición con matrices de Al con tiempos de retorno grandemente reducidos, y plateado por capas.
- 10 La invención provee la capacidad de controlar la composición, microestructura, tensiones residuales y propiedades mecánicas. El sistema es capaz de permitir la manufactura en "luces apagadas" utilizando un bucle de retroalimentación para control de proceso e integrando *hardware* y *software* en el sensor de bucle de control de retroalimentación para operación automatizada. La modelación matemática se desarrolla fácilmente para diferentes materiales utilizados en el proceso. Otras características pueden ser integradas fácilmente en el sistema, incluyendo sensores piezoeléctricos y eléctricos para la medición de acumulación de tensiones residuales, tensión y distorsión
- 15 inducidas por tensión, y para monitorear la iniciación de rupturas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema (102) para la fabricación automática de un artículo, que comprende:
- una base de datos (106) de diseño auxiliada por ordenador que incluye una descripción del artículo que se va a fabricar;
- 5 una mesa de trabajo (114) para soportar un sustrato (206);
- un láser (110) controlable que tiene un haz direccionable a una región localizada del sustrato (206) y adaptado para formar una colada fundida (204) sobre el mismo; medio (208) acoplado al láser (110) para alimentar material en la colada fundida (204) de tal manera que se cree un depósito que tenga una dimensión física;
- medios de traslación para mover el sustrato (206) con respecto al láser y el medio de alimentación (208);
- 10 medio de detección óptica (302) operativo para generar una señal eléctrica indicativa de la dimensión física del depósito a medida que se está creando; y
- un controlador (104) de retroalimentación que es operativo para ajustar el láser (110) de acuerdo con la señal eléctrica, controlando por lo tanto la tasa de deposición de material, en donde el controlador de retroalimentación (104) está en interfaz operativamente con el medio de traslación y el láser (110) y configurado para ajustar la
- 15 dimensión física del depósito de acuerdo con la descripción del artículo que va a ser fabricado en la base de datos de diseño (106) auxiliada por ordenador.
2. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el medio de traslación mueve la mesa de trabajo (114) mientras el láser (110) y el medio de alimentación (208) permanecen estacionarios.
3. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el medio de traslación mueve el láser (110) y el medio de
- 20 alimentación (208) mientras que la mesa de trabajo (114) permanece estacionaria.
4. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el sustrato (206) y el material que alimenta la colada fundida son metálicos.
5. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el material que alimenta la colada fundida es un polvo metálico.
6. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el controlador de retroalimentación (104) ajusta la potencia del
- 25 haz de láser para ajustar la tasa de deposición de material.
7. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el controlador de retroalimentación (104) ajusta el tamaño del punto del haz de láser para ajustar la tasa de deposición de material.
8. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el controlador de retroalimentación (104) ajusta la tasa de alimentación de material para ajustar la tasa de deposición de material.
- 30 9. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el controlador de retroalimentación (104) ajusta la tasa de movimiento como sucede entre el haz de láser y el sustrato para ajustar la tasa de deposición de material.
10. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde la dimensión física es la altura del material por encima del sustrato.
11. El sistema (102) de la reivindicación 1, en donde el medio de detección óptica (302) incluye una máscara con
- 35 apertura (504) a través de la cual la luz del depósito pasa hasta alcanzar el sensor optoeléctrico (506).

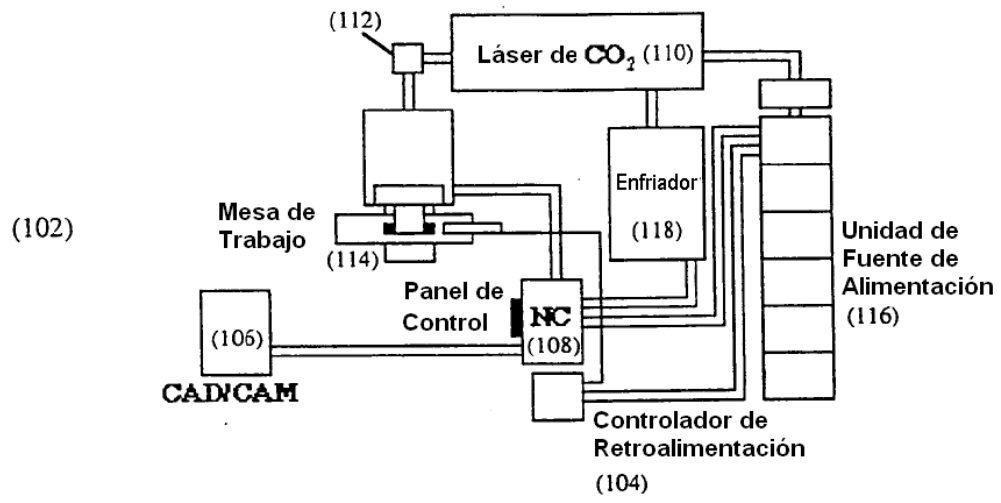


Figura 1. Sistema DMD

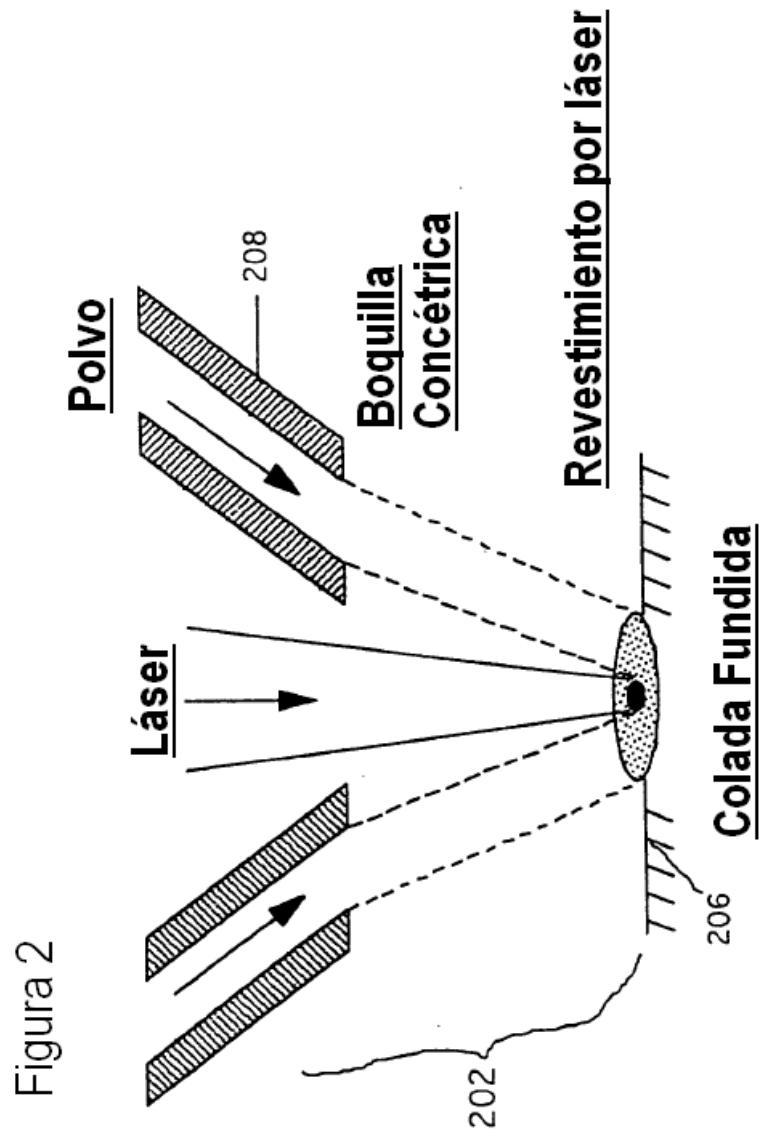
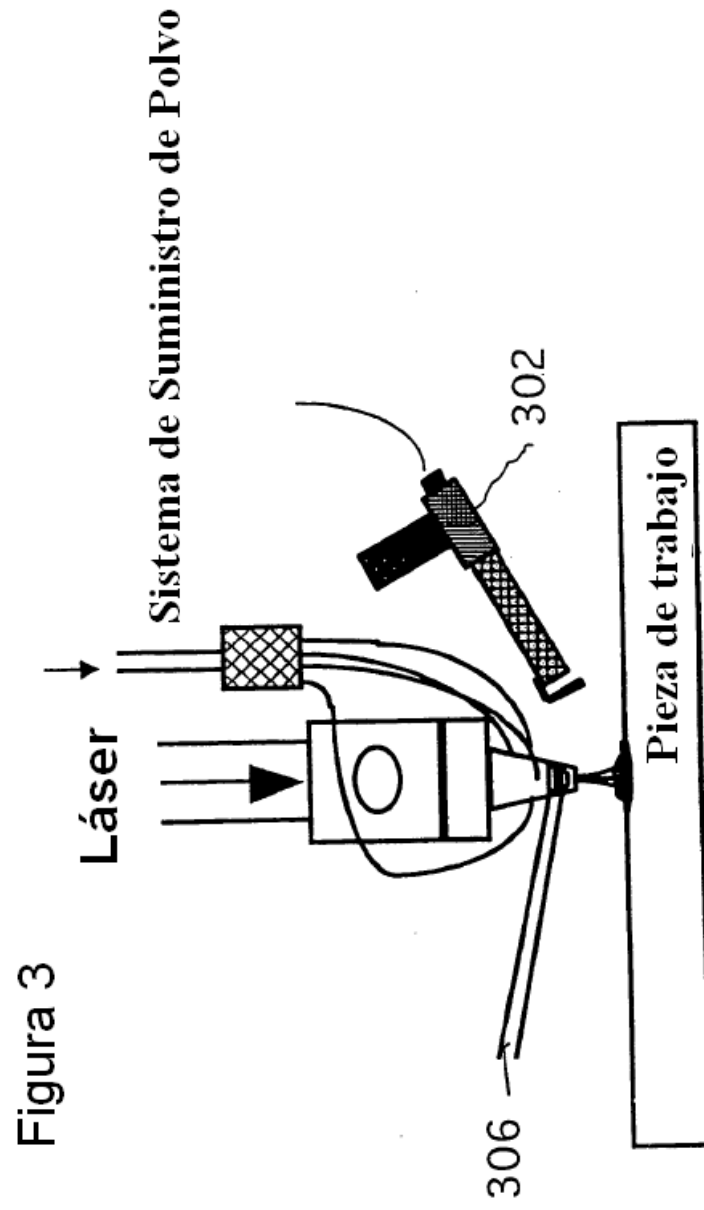
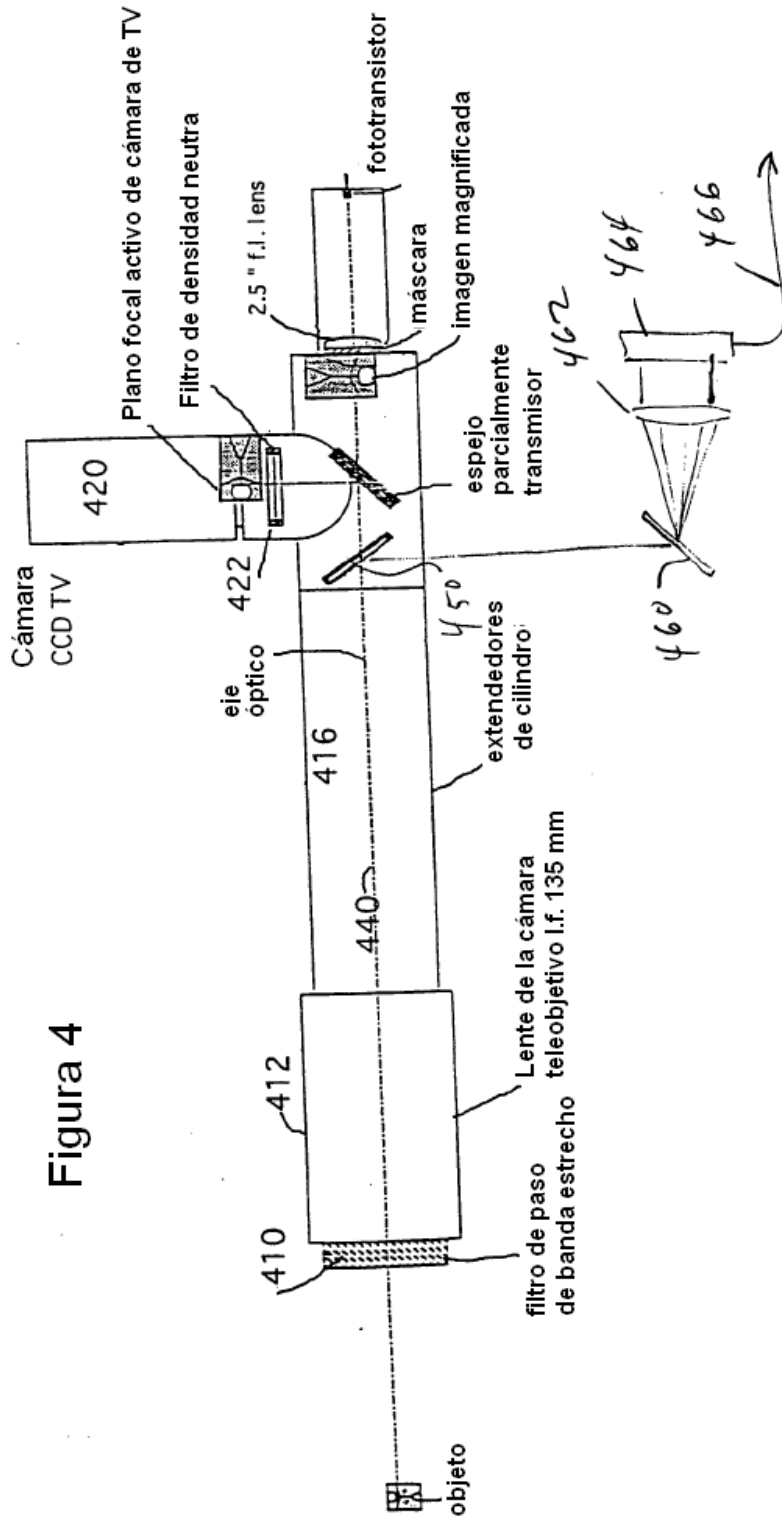


Figura 2





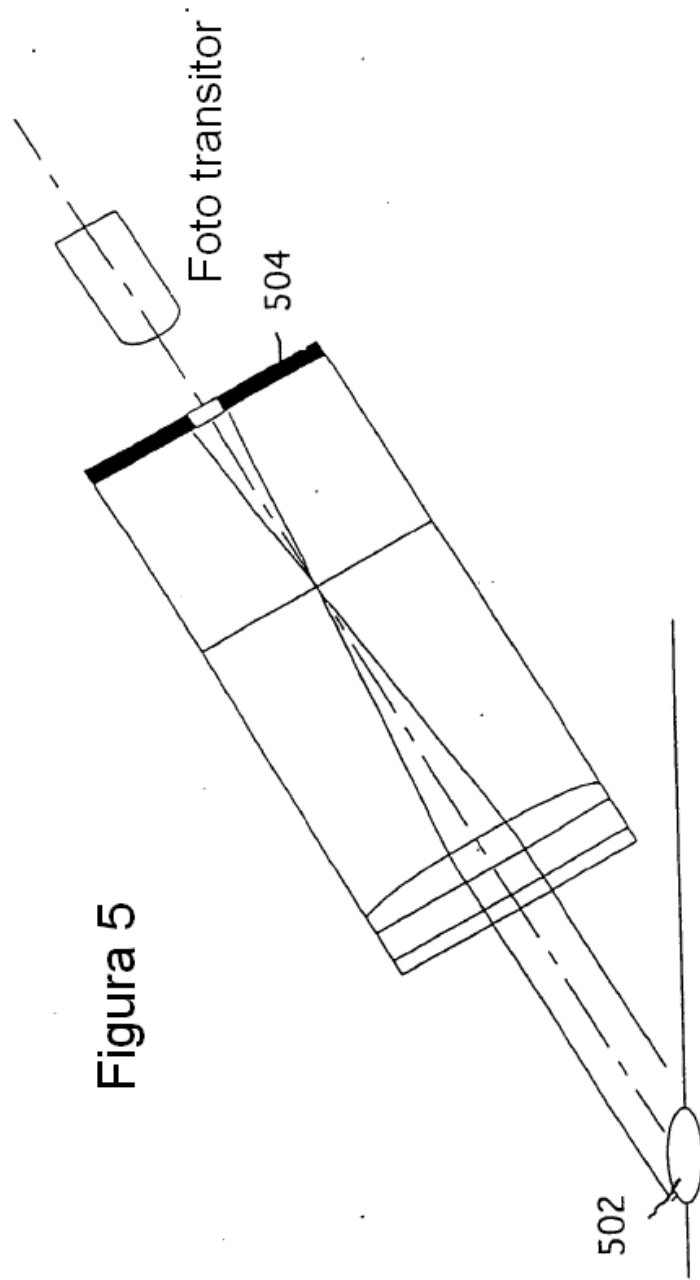


Figura 5

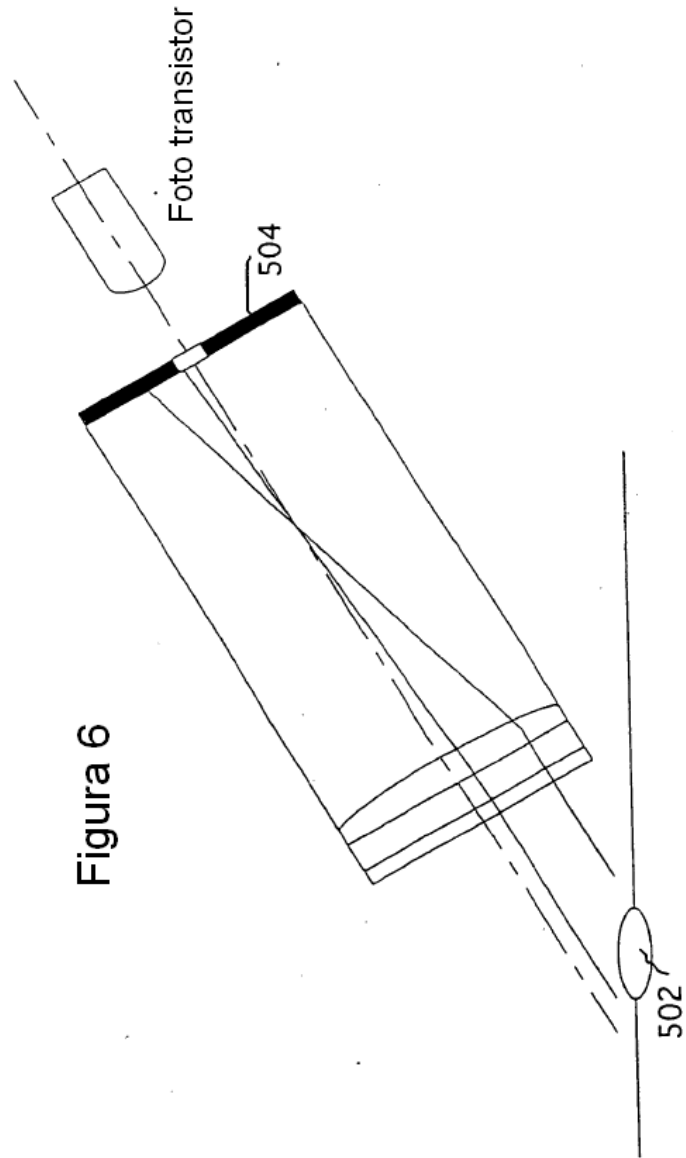


Figura 6



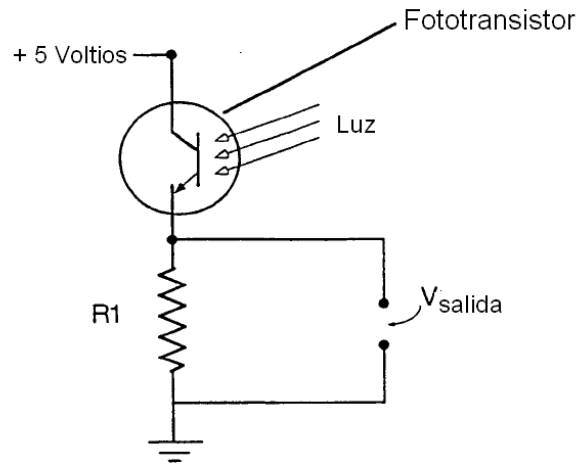


Figura 7

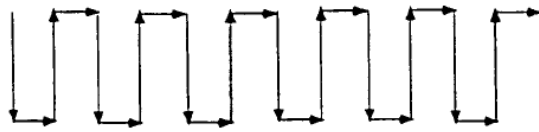


Figura 10

Patrón de surco

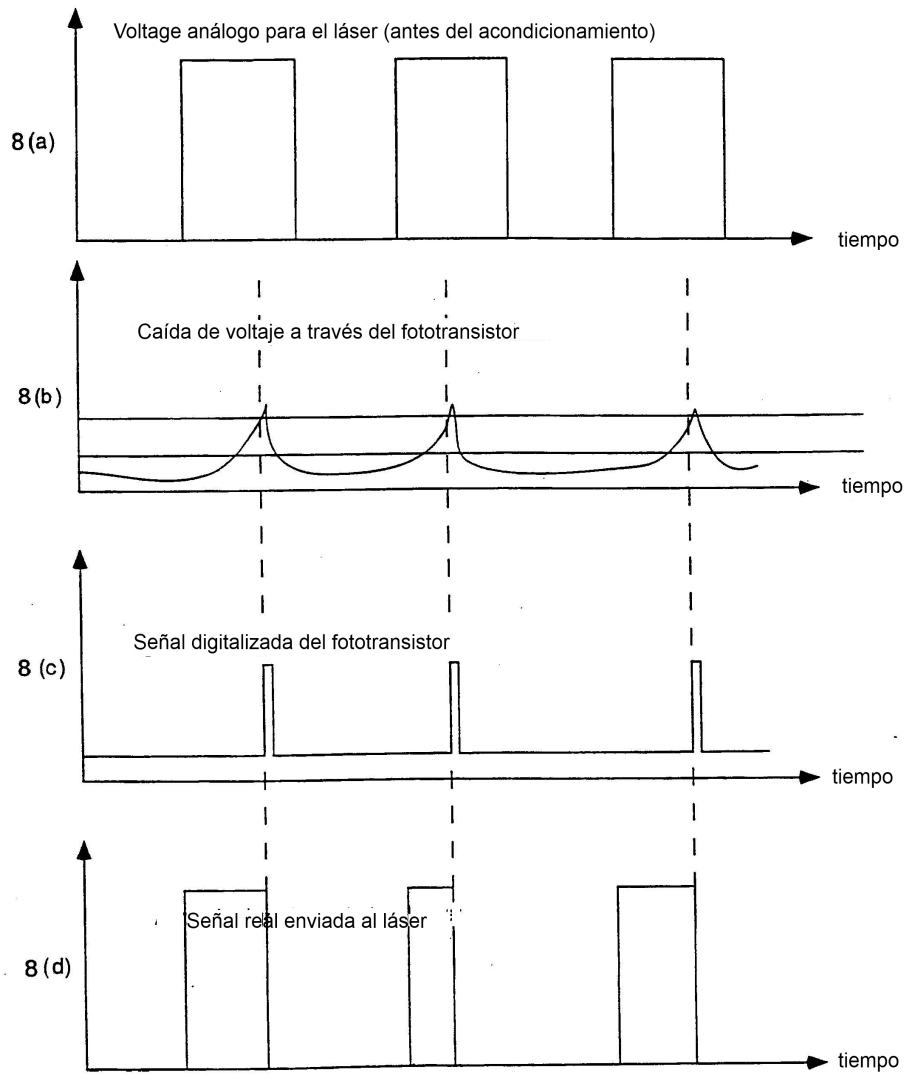


Figura 8

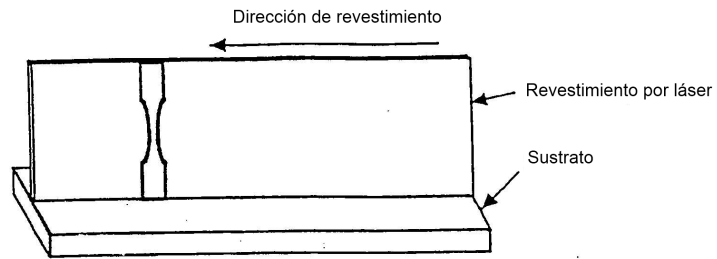


Figura 9

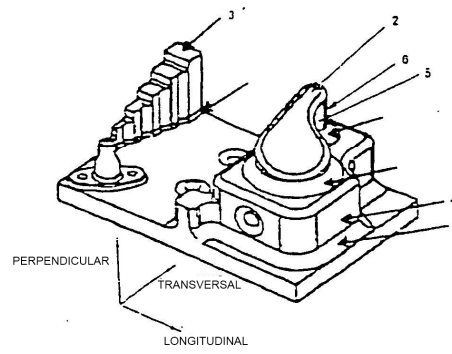


Figura 11

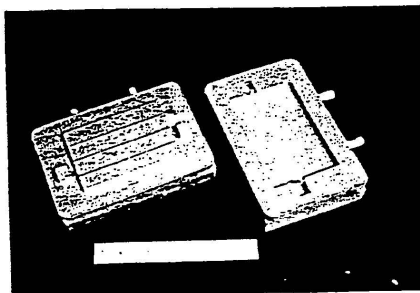


Figura 12