(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 700 924**

(51) Int. CI.:

B21C 23/32 (2006.01)
B21J 3/00 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.05.2011 PCT/US2011/036571**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **22.12.2011 WO11159413**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.05.2011 E 11722672 (0)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.09.2018 EP 2580007**

(54) Título: **Proceso de lubricación para forjabilidad mejorada**

(30) Prioridad:

14.06.2010 US 814591

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.02.2019

(73) Titular/es:

ATI PROPERTIES LLC (100.0%)
1600 N.E. Old Salem Road
Albany, OR 97321, US

(72) Inventor/es:

OPPENHEIMER, SCOTT;
FORBES JONES, ROBIN M.;
MANTIONE, JOHN;
MINISANDRAM, RAMESH y
THOMAS, JEAN-PHILIPPE

(74) Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

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

Proceso de lubricación para forjabilidad mejorada

Campo técnico

La presente divulgación se dirige a procesos para disminuir la fricción entre matrices y piezas de trabajo durante operaciones de forja e incrementar la forjabilidad de las piezas de trabajo, tal como, por ejemplo, lingotes y tochos de metal y aleaciones.

Antecedentes

La “forja” se refiere a trabajar y/o dar forma a un material de estado sólido mediante deformación plástica. La forja se distingue de las otras clasificaciones primarias de operaciones de formación de materiales de estado sólido, es decir, mecanizado (dar forma a una pieza de trabajo mediante corte, fresado, o eliminando material en otra forma de la pieza de trabajo) y fundición (moldeo de material líquido que solidifica para retener la forma de un molde). La forjabilidad es la capacidad relativa del material para deformarse plásticamente sin fallo. La forjabilidad depende de un cierto número de factores que incluyen, por ejemplo, las condiciones de forja (por ejemplo, temperatura de la pieza de trabajo, temperatura de la matriz, y relación de deformación) y características del material (por ejemplo, composición, microestructura, y estructura superficial). Otro factor que afecta a la forjabilidad de una pieza de trabajo dada es la tribología de la interacción de las superficies de la matriz y superficies de la pieza de trabajo.

La interacción entre las superficies de la matriz y las superficies de la pieza de trabajo en una operación de forja implica la transferencia de calor, fricción y desgaste. Como tales, el aislamiento y la lubricación entre una pieza de trabajo y las matrices de forja son factores que influyen en la forjabilidad. En las operaciones de forja, se disminuye la fricción mediante el uso de lubricantes. Sin embargo, los lubricantes de forja anteriores tienen diversas deficiencias, particularmente en el contexto de forja en caliente de aleaciones de titanio y superaleaciones. La presente divulgación se dirige a procesos de lubricación para disminuir la fricción entre matrices y piezas de trabajo durante operaciones de forja que superen diversas deficiencias de métodos de lubricación de forja previos.

La patente GB n.º 684 013, que forma la base del preámbulo de la reivindicación 1, se refiere al trabajo en caliente de metales, particularmente mediante embutición, extrusión, aplanado, rebordeado, laminado e hilado, etc. y consiste en la etapa de interponer una lámina flexible de lubricante entre la pieza calentada y la herramienta. En lubricante puede ser vidrio y este puede formarse como fibras que pueden tejerse, entrelazarse o entremezclarse en otra forma con la adición de un aglomerante si se requiere. En una modificación, el vidrio puede estar granulado y envolverse por o interponerse en un tejido de fieltro que por sí mismo puede ser un lubricante o en una lámina de vidrio flexible como anteriormente. La lámina de vidrio flexible puede prepararse mediante enrollado de fibras continuas en un tambor. La pieza se calienta preferentemente mediante inmersión en un baño de sal, ayudando el recubrimiento de sal formado sobre la pieza de trabajo a la adhesión de la lámina de vidrio. Tanto la pieza de trabajo como la herramienta pueden cubrirse por la lámina, por ejemplo mediante la envoltura. Para extrusión el tocho calentado se lamina sobre una lámina de tela de vidrio antes de la introducción en el contenedor y en donde los tubos han de extrudirse el mandril se envuelve previamente a la introducción en un tocho hueco. En la forja, la matriz se cubre por la lámina, el tocho calentado se superpone y cubre por otra lámina, y la operación se lleva a cabo a continuación de la forma usual.

La solicitud de patente PCT WO99/02743 divulga la producción de un artículo metálico con estructura y textura metalúrgica fina mediante un proceso que incluye la forja y laminado y control de las condiciones de forja y de laminado. También se describe un artículo metálico con un mínimo de tamaño de grano estadísticamente cristalizado con diferencia en tamaño de grano en cualquier localización de menos de aproximadamente +/- 3 %, así como una dispersión en la relación de contenido en orientación de texturas de menos de aproximadamente +/- 4 % en cualquier localización.

La patente GB n.º 1 202 080 divulga un tocho cilíndrico recalcado entre matrices, interponiéndose una capa de lubricante sólido y una capa de chapa metálica entre el tocho y cada matriz. El tocho se calienta a 1180 °C antes del primer golpe y se recalienta y suministra con una chapa nueva y lubricante cuando son necesarios golpes adicionales. La chapa se pliega alrededor del tocho para atrapar el lubricante durante la forja. El lubricante puede ser fibra de vidrio o lana de escoria y puede usarse más de una capa. La chapa es de níquel, acero dulce o aleación níquel-cromo.

Sumario

La invención se expone en la reivindicación independiente, aspectos adicionales se definen en las reivindicaciones dependientes.

Breve descripción de los dibujos

Diversas características de ciertas realizaciones no limitativas divulgadas y descritas en el presente documento pueden entenderse mejor por referencia a las figuras adjuntas, en las que:

La figura 1A es un diagrama esquemático en sección transversal que ilustra el recalcado por forja de matriz abierta de una pieza de trabajo bajo condiciones sin fricción, y la figura 1B es un diagrama esquemático en sección transversal que ilustra el recalcado por forja de matriz abierta de una pieza de trabajo idéntica bajo condiciones de elevada fricción;

Las figuras 2A, 2B y 2C son vistas en perspectiva de una pieza de trabajo cilíndrica envuelta en una lámina de lubricante sólido;

Las figuras 3A y 3C son diagramas esquemáticos en sección transversal que ilustran una operación de forja de matriz abierta sin láminas lubricantes sólidas, y las figuras 3B y 3D son diagramas esquemáticos en sección transversal que ilustran una operación de forja de matriz abierta idéntica que emplea láminas de lubricante sólido de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento;

Las figuras 4A, 4C y 4E son diagramas esquemáticos en sección transversal que ilustran una operación de forja de matriz abierta sin láminas lubricantes sólidas, y las figuras 4B, 4D y 4F son diagramas esquemáticos en sección transversal que ilustran una operación de forja de matriz abierta idéntica empleando láminas lubricantes sólidas de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento;

La figura 5A es un diagrama esquemático en sección transversal que ilustra una operación de forja radial sin láminas lubricantes sólidas, y la figura 5B es un diagrama esquemático en sección transversal que ilustra una operación de forja radial idéntica que emplea una lámina de lubricante sólido de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento;

Las figuras 6A y 6C son diagramas esquemáticos en sección transversal que ilustran una operación de forja de matriz cerrada sin láminas lubricantes sólidas, y las figuras 6B y 6D son diagramas esquemáticos en sección transversal que ilustran una operación de forja de matriz cerrada idéntica que emplea láminas lubricantes sólidas de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento;

Las figuras 7A, 7A, 7B y 7D son diagramas esquemáticos en sección transversal que ilustran diversas configuraciones de láminas lubricantes sólidas y láminas de aislamiento con relación a la pieza de trabajo y matrices en un aparato de forja;

La figura 8 es un diagrama esquemático en sección transversal que ilustra la configuración general de un ensayo de compresión en anillo;

la figura 9 es un diagrama esquemático en sección transversal que ilustra las formas de los anillos comprimidos bajo diversas condiciones de fricción en un ensayo de compresión en anillo;

la figura 10A es una vista en sección en perspectiva de una muestra de anillo antes de la compresión en un ensayo de compresión en anillo, la figura 10B es una vista en sección en perspectiva de una muestra de anillo después de la compresión con fricción relativamente baja en un ensayo de compresión en anillo, y la figura 10C es una vista en sección en perspectiva de una muestra de anillo después de la compresión con fricción relativamente alta en un ensayo de compresión en anillo;

la figura 11A es una vista superior de una muestra de anillo antes de la compresión en un ensayo de compresión en anillo, y la figura 11B es una vista lateral de una muestra de anillo antes de la compresión en un ensayo de compresión en anillo; y

la figura 12 es un gráfico de la correlación entre el diámetro interior comprimido y el factor de cortadura para un ensayo de compresión en anillo de una aleación Ti-6Al-4V.

El lector apreciará los detalles precedentes, así como otros, tras la consideración de la descripción detallada que sigue de diversas realizaciones no limitativas de acuerdo con la presente divulgación. El lector puede también comprender detalles adicionales tras implementar o usar las realizaciones descritas en el presente documento.

Descripción detallada de realizaciones no limitativas

En operaciones de forja, la fricción en la interfaz entre las superficies de la pieza de trabajo y la superficie de la matriz pueden expresarse cuantitativamente como tensiones cortantes de fricción. Las tensiones cortantes de fricción (τ) pueden expresarse en función de la tensión de flujo sólido del material en deformación (σ) y el factor de cortadura (m) mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{m}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}$$

El valor del factor de cortadura proporciona una medición cuantitativa de la lubricidad para un sistema de forja. Por ejemplo, el factor de cortadura puede variar desde 0,6 a 1,0 cuando se forjan piezas de aleación de titanio sin lubricantes, mientras que el factor de cortadura puede variar desde 0,1 a 0,3 cuando se forjan en caliente piezas de trabajo de aleación de titanio con ciertos lubricantes molidos.

La lubricación de forja inadecuada, caracterizada, por ejemplo, por un valor relativamente alto del factor de cortadura para una operación de forja, puede tener un cierto número de efectos adversos. Durante la forja, el flujo en estado sólido del material es provocado por la fuerza transmitida desde las matrices a la pieza de trabajo en deformación plástica. Las condiciones de fricción en la interfaz matriz/pieza de trabajo influyen en el flujo del metal, la formación de la superficie y las tensiones internas dentro de la pieza de trabajo, tensiones que actúan sobre las matrices, y la carga de presión y requisitos de energía. Las figuras 1A y 1B ilustran ciertos efectos de la fricción en conexión con una operación de recalcado por forja de matriz abierta.

La figura 1A ilustra el recalcado por forja de matriz abierta de una pieza de trabajo cilíndrica 10 bajo condiciones sin fricción teóricas. La figura 1B ilustra el recalcado por forja de matriz abierta de una pieza de trabajo cilíndrica 10 idéntica bajo condiciones de alta fricción. Las matrices superiores 14 presionan la pieza de trabajo 10 desde su altura inicial (mostrada por líneas discontinuas) hasta una altura forjada H. La fuerza de recalcado se aplica con igual magnitud y en dirección opuesta a las piezas de trabajo 10 por las matrices superiores 14 y las matrices inferiores 16. El material que forma las piezas de trabajo 10 es incomprensible y, por lo tanto, los volúmenes de las piezas de trabajo 10 iniciales y de las piezas de trabajo 10a y 10b forjadas son iguales. Bajo las condiciones sin fricción ilustradas en la figura 1A, la pieza de trabajo 10 se deforma uniformemente en las direcciones axial y radial. Esto se indica por el perfil lineal 12a de la pieza de trabajo 10a forjada. Bajo las condiciones de alta fricción ilustradas en la figura 1B, la pieza de trabajo 10 no se deforma uniformemente en las direcciones axial y radial. Esto se indica por el perfil curvado 12b de la pieza de trabajo 10b forjada.

De esta forma, la pieza de trabajo 10b forjada presenta “abarrilamiento” bajo condiciones de alta fricción, mientras que la pieza de trabajo 10a forjada no presenta ningún abarrilamiento bajo condiciones sin fricción. El abarrilamiento y otros efectos de deformación plástica no uniforme debido a la fricción de interfaz matriz/pieza de trabajo durante la forja son en general indeseables. Por ejemplo, en la forja de matriz cerrada, la fricción de interfaz puede provocar la formación de espacios vacíos en donde la deformación del material no llega a todas las cavidades en la matriz. Esto puede ser particularmente problemático en operaciones de forja de forma final o forma casi final en las que las piezas de trabajo se forjan dentro de tolerancias más estrechas. Como resultado, los lubricantes de forja pueden emplearse para reducir la fricción de interfaz entre las superficies de la matriz y las superficies de la pieza de trabajo durante operaciones de forja.

De acuerdo con la invención, un proceso de lubricación de forja comprende posicionar una lámina de lubricante sólido entre una pieza de trabajo y la matriz en un aparato de forja. Tal como se usa en el presente documento, una “lámina de lubricante sólido” es una pieza relativamente delgada de material que comprende un lubricante en estado sólido que reduce la fricción entre superficies metálicas. El lubricante en estado sólido está en estado sólido bajo condiciones ambientales y permanece en el estado sólido durante las condiciones de forja (por ejemplo, a elevadas temperaturas). La lámina de lubricante sólido puede disminuir el factor de cortadura entre una matriz y una pieza de trabajo durante la forja a menos de 0,20. La lámina de lubricante sólido comprende un material lubricante en estado sólido seleccionado dentro del grupo que consiste en grafito, disulfuro de molibdeno, disulfuro de tungsteno y nitruro de boro.

En diversas realizaciones, una lámina de lubricante sólido puede comprender un lubricante en estado sólido que tenga un coeficiente de fricción menor que o igual a 0,3 a temperatura ambiente y/o una temperatura de punto de fusión mayor que o igual a 815 °C (1500 °F). Los lubricantes de estado sólido que encuentran utilidad en las láminas de lubricante sólido divulgadas en el presente documento pueden caracterizarse también, por ejemplo, por un valor de tensión de flujo cortante de hasta e incluyendo el 20 % del valor de tensión de flujo cortante del material que se está forjando con una lámina de lubricante sólido que comprende lubricante en estado sólido. En diversas realizaciones, un lubricante de estado sólido que comprende una lámina de lubricante sólido puede caracterizarse por una ductilidad de cortadura mayor que o igual al 500 %. Los lubricantes de estado sólido que encuentran utilidad en las láminas de lubricante sólido divulgadas en el presente documento poseen la capacidad de ser procesados en forma de lámina, con o sin aglomerante o agente adhesivo adecuado.

En diversas realizaciones, la lámina de lubricante sólido puede ser flexible y capaz de ser situada en cavidades y sobre contornos y superficies no planas de matrices de forja y/o piezas de trabajo. En diversas realizaciones, la lámina de lubricante sólido puede ser rígida y mantener una forma o contorno preformado mientras se posiciona entre una matriz y la pieza de trabajo en un aparato de forja.

De acuerdo con la invención, la lámina de lubricante sólido consiste en un compuesto lubricante en estado sólido tal como grafito, disulfuro de molibdeno, disulfuro de tungsteno y/o nitruro de boro e impurezas residuales (tales como,

por ejemplo, cenizas), y no contiene aglomerantes, rellenos u otros aditivos.

En diversas realizaciones, la lámina de lubricante sólido puede tener un grosor en el intervalo de 0,13 mm (0,005 pulgadas) a 25,4 mm (1,000 pulgadas), o cualquier subintervalo del presente documento. Por ejemplo, en diversas realizaciones, la lámina de lubricante sólido puede tener un grosor mínimo, máximo, o promedio de 0,13 mm (0,005 pulgadas), 0,15 mm (0,006 pulgadas), 0,25 mm (0,010 pulgadas), 0,38 mm (0,015 pulgadas), 0,51 mm (0,020 pulgadas), 0,64 mm (0,025 pulgadas), 0,76 mm (0,030 pulgadas), 0,89 mm (0,035 pulgadas), 1,02 mm (0,040 pulgadas), 1,52 mm (0,060 pulgadas), 1,57 mm (0,062 pulgadas), 3,05 mm (0,120 pulgadas), 3,10 mm (0,122 pulgadas), 6,10 mm (0,24 pulgadas), 12,70 mm (0,5 pulgadas), o 19,05 mm (0,75 pulgadas). Los grosores anteriores pueden obtenerse mediante una única lámina de lubricante sólido o con un apilado de múltiples láminas de lubricante sólido.

El grosor de la lámina o apilado de láminas de lubricante sólido usado en una operación de forja puede depender de diversos factores que incluyen la temperatura de forja, el tiempo de forja, el tamaño de la pieza de trabajo, tamaño de la matriz, presión de forja, grado de deformación de la pieza de trabajo, y similares. Por ejemplo, la temperatura de la pieza de trabajo y de una matriz en una operación de forja puede afectar a la lubricidad de la lámina de lubricante sólido y a la transferencia de calor a través de la lámina de lubricante sólido. Láminas o apilados de láminas más gruesos pueden ser útiles a temperaturas más altas y/o tiempos de forja más largos debido, por ejemplo, la compresión, aglutinamiento, y/u oxidación del lubricante en estado sólido. En diversas realizaciones, las láminas de lubricante sólido divulgadas en el presente documento pueden mermar sobre las superficies de la pieza de trabajo y/o de una matriz durante una operación de forja y, por lo tanto, pueden ser útiles láminas o apilados de láminas más gruesos para una deformación incrementada de la pieza de trabajo.

En diversas realizaciones, la lámina de lubricante sólido puede ser una lámina de grafito sólido. La lámina de grafito sólido puede tener un contenido de carbón grafítico de al menos el 95 % en peso de la lámina de grafito. Por ejemplo, la lámina de grafito sólido puede tener un contenido de carbón grafítico de al menos el 96 %, 97 %, 98 %, 98,2 %, 99,5 %, o 99,8 %, en peso de la lámina de grafito. Las láminas de grafito sólido adecuadas para los procesos divulgados en el presente documento incluyen, por ejemplo, los diversos grados de materiales de grafito flexible Grafoil® disponible en GrafTech International, Lakewood, Ohio, Estados Unidos; los diversos grados de hojas de grafito, láminas, filtros y similares, disponibles en HP Materials Solutions, Inc., Woodland Hills, California, Estados Unidos; los diversos grados de materiales de grafito Graph-Lock® disponibles en Garlock Sealing Technologies, Palmyra, Nueva York, Estados Unidos; los diversos grados de grafito flexible disponible en Thermoseal, Inc., Sidney, Ohio, Estados Unidos; y los diversos grados de productos de lámina de grafito disponibles en DAR Industrial Products, Inc., West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos.

En diversas realizaciones, puede posicionarse una lámina de lubricante sólido sobre una superficie de trabajo de una matriz sobre un aparato de forja y posicionarse una pieza de trabajo sobre la lámina de lubricante sólido sobre la matriz. Como se usa en el presente documento, una “superficie de trabajo” de una matriz es una superficie que se pone, o puede ponerse, en contacto con una pieza de trabajo durante una operación de forja. Por ejemplo, una lámina de lubricante sólido puede posicionarse sobre una matriz inferior de un aparato de forja de prensa y se posiciona una pieza de trabajo sobre la lámina de lubricante sólido de modo que la lámina de lubricante sólido esté en una posición interpuesta entre una superficie inferior de la pieza de trabajo y la matriz inferior. Puede posicionarse una lámina de lubricante sólido adicional sobre una superficie superior de la pieza de trabajo antes o después de que la pieza de trabajo se posicione sobre la lámina de lubricante sólido en la matriz inferior. Alternativamente, o además, puede posicionarse una lámina de lubricante sólido sobre una matriz superior en el aparato de forja. En esta forma, puede interponerse al menos una lámina de lubricante sólido adicional entre una superficie superior de la pieza de trabajo y la matriz superior. Puede aplicarse entonces fuerza a la pieza de trabajo entre las matrices para deformar plásticamente la pieza de trabajo con fricción disminuida entre las matrices y la pieza de trabajo, lo que disminuye indeseables efectos de fricción.

En diversas realizaciones, una lámina de lubricante sólido puede ser una lámina flexible o rígida que puede doblarse, formarse, o contornearse para adaptarse a la forma de una matriz y/o de la pieza de trabajo en una operación de forja. La lámina de lubricante sólido puede doblarse, formarse, o contornearse antes de ser posicionada sobre una pieza de trabajo y/o una matriz en un aparato de forja, es decir, preformarse en una forma o contorno predeterminado. Por ejemplo, las formas preformadas pueden incluir uno o más pliegues en una lámina de lubricante sólido (por ejemplo, un doblez axial de aproximadamente 135° para ayudar a la colocación de la lámina sobre la superficie curvada superior de una pieza de trabajo cilíndrica a lo largo de su eje longitudinal, o uno o más dobleces aproximadamente de 90° para ayudar en la colocación de la lámina sobre una pieza de trabajo rectangular). Alternativamente, la lámina de lubricante sólido puede formarse como un manguito, tubo, cilindro hueco, u otra geometría flexible o rígida dirigida a localizar y a asegurar mecánicamente la lámina de lubricante sólido sobre una superficie de la matriz o de la pieza de trabajo antes de la forja.

Cuando se interpone una lámina de lubricante sólido entre una matriz y una pieza de trabajo en un aparato de forja, la lámina de lubricante sólido puede proporcionar una barrera de estado sólido entre la matriz y la pieza de trabajo. En esta forma, la matriz hace contacto indirectamente con la pieza de trabajo a través de la lámina de lubricante sólido, lo que reduce la fricción entre la matriz y la pieza de trabajo. El lubricante en estado sólido de la lámina de lubricante

sólido puede caracterizarse por un valor de tensión de flujo cortante relativamente bajo y un valor de ductilidad de cortadura relativamente alto, lo que permite a la lámina de lubricante sólido fluir a lo largo de la interfaz matriz-pieza de trabajo como una película continua durante la forja. Por ejemplo, en diversas realizaciones, los lubricantes de estado sólido que encuentran utilidad en las láminas de lubricante sólido divulgadas en el presente documento pueden caracterizarse, por ejemplo, por una ductilidad de cortadura mayor que o igual al 500 % y un valor de tensión de flujo cortante de hasta, e incluyendo, el 20 % del valor de tensión de flujo cortante del material que se está forjando con una lámina de lubricante sólido que comprende el lubricante en estado sólido.

A modo de ejemplo, el lubricante en estado sólido grafito está compuesto por capas de grafeno apiladas. Las capas de grafeno son capas de un átomo de carbono de grosor enlazadas de modo covalente. Las fuerzas cortantes entre capas de grafeno en el grafito son muy bajas y, por lo tanto, las capas de grafeno pueden deslizar relativamente entre sí con muy poca resistencia. En esta forma, el grafito presenta una tensión de flujo cortante relativamente baja y una ductilidad de cortadura relativamente alta, lo que permite a la lámina de grafito fluir a lo largo de la interfaz matriz-pieza de trabajo como una película continua durante la forja. El nitruro de boro, disulfuro de molibdeno y disulfuro de tungsteno hexagonales tienen estructuras de retícula cristalina similares con muy bajas fuerzas cortantes entre las capas de la retícula cristalina lo que minimiza la resistencia entre las superficies deslizantes y, por lo tanto, presentan propiedades análogas de lubricidad seca.

Durante la operación de forja, dado que la lámina de lubricante sólido se comprime entre una matriz y una pieza de trabajo y fluye en cizalla para mantener la lubricidad, puede adherirse mecánicamente a las superficies de la matriz y pieza de trabajo cuando la lámina de lubricante sólido se compacta en localizaciones en donde se aplica la presión de forja. En diversas realizaciones, cualquier lámina de lubricante sólido compactada o “cuajada” puede retenerse sobre o retirarse de o bien la pieza de trabajo o bien la matriz antes de operaciones de forja posteriores u otras operaciones.

En diversas realizaciones, puede posicionarse una lámina de lubricante sólido sobre una pieza de trabajo antes de que la pieza de trabajo se posicione en un aparato de forja. Por ejemplo, al menos una parte de una superficie de la pieza de trabajo puede envolverse con una lámina de lubricante sólido. Las figuras 2A a 2C ilustran una pieza de trabajo 20 cilíndrica envuelta con una lámina de lubricante sólido 28 antes de la forja. La figura 2A muestra todas las superficies exteriores de la pieza de trabajo 20 cubiertas por láminas de lubricante sólido 28. La figura 2B muestra solo las superficies circunferenciales de la pieza de trabajo 20 cubiertas por una lámina de lubricante sólido 28. No se sitúa ninguna lámina de lubricante sólido sobre las superficies extremas de la pieza de trabajo 20 en la figura 2B. La figura 2C muestra la pieza de trabajo 20 de la figura 2B con una parte de la lámina de lubricante sólido 28 retirada para ver la superficie cilíndrica 21 subyacente de la pieza de trabajo 20.

En diversas realizaciones, puede posicionarse una lámina de lubricante sólido sobre uno o más de las matrices en un aparato de forja antes de que se posicione una pieza de trabajo en el aparato de forja. En diversas realizaciones, se posicionan láminas de lubricante sólido horneadas con adhesivo sobre piezas de trabajo y/o matrices antes de la forja. Alternativamente, pueden sujetarse las láminas de lubricante sólido con un adhesivo separado sobre las piezas de trabajo y/o matrices para asegurar mejor el adecuado posicionamiento de las láminas de lubricante sólido durante la operación de forja. En realizaciones en donde la operación de forja comprende dos o más recorridos del aparato de forja, pueden interponerse láminas de lubricante sólido adicionales entre una superficie de la matriz y una superficie de la pieza de trabajo entre cualesquiera dos recorridos.

Los procesos de lubricación de forja divulgados en el presente documento pueden aplicarse a cualquier operación de forja en la que fuera ventajosa una lubricación y forjabilidad mejoradas. Por ejemplo, y sin limitación, los procesos de lubricación de forja divulgados en el presente documento pueden aplicarse a forja de matriz abierta, forja de matriz cerrada, extrusión directa, extrusión posterior, forjado radial, forjado por recalcado, y forjado por embutición. Además, los procesos de lubricación de forja divulgados en el presente documento pueden aplicarse a operaciones de forja de forma final y forma casi final.

Las figuras 3A a 3D ilustran operaciones de forja de prensado de matriz plano abierto. Las figuras 3A y 3C muestran la operación de forja sin láminas de lubricante sólido y las figuras 3B y 3D muestran una operación de forja empleando láminas de lubricante sólido de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento. Las matrices superiores 34 presionan las piezas de trabajo 30 desde su altura inicial a una altura forjada. La fuerza de presión se aplica a las piezas de trabajo 30 por las matrices superiores 34 y las matrices inferiores 36. El material de las piezas de trabajo 30 es incompresible y, por lo tanto, los volúmenes de las piezas de trabajo 30 iniciales y de las piezas de trabajo 30a y 30b forjadas son iguales. Sin lubricante, la pieza de trabajo 30a forjada mostrada en la figura 3C no se deforma uniformemente y presenta abarrilamiento en 32a debido a la fricción relativamente alta entre la pieza de trabajo 30 y las matrices 34 y 36.

Como se ilustra en la figura 3B, se posicionan láminas de lubricante sólido 38 entre la pieza de trabajo 30 y las matrices 34 y 36 superior e inferior, respectivamente. Se posiciona una lámina de lubricante sólido 38 sobre la matriz inferior 36 y la pieza de trabajo 30 se posiciona sobre la lámina de lubricante sólido 38. Se posiciona una lámina de lubricante sólido 38 adicional sobre la superficie superior de la pieza de trabajo 30. Las láminas de lubricante sólido 38 son flexibles y capaces de posicionarse para envolver la pieza de trabajo 38. Con las láminas de lubricante sólido 38, la pieza de trabajo 30b forjada mostrada en la figura 3D se deforma más uniformemente y presenta menos abarrilamiento

en 32b debido a la fricción disminuida entre la pieza de trabajo 30 y las matrices 34 y 36.

Las figuras 4A a 4F ilustran operaciones de forja de matriz abierta con forma de V. Las figuras 4A, 4C y 4E muestran una operación de forja sin láminas de lubricante sólido, y las figuras 4B, 4D y 4F muestran una operación de forja idéntica empleando láminas de lubricante sólido de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento. Las figuras 4A y 4B muestran las piezas de trabajo 40 posicionadas descentradas con respecto a las cavidades de la matriz con forma de V. Como se ilustra en la figura 4B, se posicionan láminas de lubricante sólido 48 entre la pieza de trabajo 40 y las matrices 44 y 46 superior e inferior, respectivamente. Se posiciona una lámina de lubricante sólido 48 sobre la matriz inferior 46 y se posiciona la pieza de trabajo 40 sobre la lámina de lubricante sólido 48. Se posiciona una lámina de lubricante sólido 48 adicional sobre la superficie superior de la pieza de trabajo 40. Las láminas de lubricante sólido 48 son flexibles y capaces de posicionarse para adaptarse al contorno de la cavidad con forma de V de la matriz inferior 46 y para cubrir la pieza de trabajo 48.

Las figuras 4C y 4D muestran las piezas de trabajo 40 justamente cuando se realiza el contacto con la matriz superior 44 y está comenzando a aplicarse presión a las piezas de trabajo 40. Como se muestra en la figura 4C, durante el recorrido de prensado cuando la matriz superior 44 hace contacto con la pieza de trabajo 40 sin lubricación, la alta fricción entre las superficies de contacto de la pieza de trabajo 40 y las matrices 44 y 46 provoca que la pieza de trabajo se pegue a las matrices como se indica en 47. Este fenómeno, al que puede referirse como “bloqueo de la matriz”, puede ser particularmente indeseable en operaciones de forja que impliquen una superficie de matriz contorneada en la que una pieza de trabajo posicionada descentrada puede bloquear la matriz y no deformarse apropiadamente para adoptar los contornos de la matriz.

Durante un recorrido de prensado en una operación de forja sin lubricación, una pieza de trabajo puede bloquear la matriz hasta que la fuerza de presión supera las fuerzas de fricción de adhesión. Cuando la fuerza de presión supera las fuerzas de adhesión por fricción en una operación de forja no lubricada, la pieza de trabajo puede acelerar rápidamente dentro del aparato de forja. Por ejemplo, como se ilustra en la figura 4C, cuando la fuerza de presión supera las fuerzas de fricción de adhesión entre las piezas de trabajo 40 y las matrices 44 y 46 (indicado en 47), la pieza de trabajo 40 puede acelerar rápidamente hacia abajo al centro de la cavidad con forma de V de la matriz 46 como se indica por la flecha 49.

La rápida aceleración de una pieza de trabajo dentro de un aparato de forja puede dañar la pieza de trabajo, el aparato de forja, o ambos. Por ejemplo, cuando la fuerza de prensado excede las fuerzas de fricción de adhesión, la pieza de trabajo y/o las matrices pueden corroerse por fricción, es decir, el material puede eliminarse indeseablemente de las áreas de contacto localizadas que se agarran durante el bloqueo de la matriz (por ejemplo, las áreas 47 en la figura 4C). Adicionalmente, una pieza de trabajo forjada puede arruinarse, rayarse, descascarillarse, agrietarse y/o fracturarse si la pieza de trabajo se acelera dentro del aparato de forja. El bloqueo de la matriz también afecta adversamente a la capacidad para mantener el control dimensional sobre los artículos forjados. Además, el rápido movimiento dentro del aparato de forja puede provocar un impacto forzoso con superficies de componentes del aparato de forja y sacudidas del aparato de forja, lo que puede dañar el aparato de forja o acortar en otra forma la vida útil de los componentes del aparato de forja.

Durante un recorrido de prensado en una operación de forja con una lámina de lubricante sólido, una pieza de trabajo descentrada no experimenta bloqueo de la matriz debido a la disminución de la fricción. La lámina de lubricante sólido disminuye significativamente o elimina la fricción de adhesión y, por lo tanto, no tiene lugar una rápida aceleración inaceptable de la pieza de trabajo. En su lugar, tiene lugar una acción de autocentrado relativamente suave cuando la matriz superior hace contacto con la pieza de trabajo o una lámina de lubricante sobre la pieza de trabajo. Por ejemplo, como se ilustra en la figura 4D, cuando la matriz superior 44 contacta con la pieza de trabajo 40, las láminas de lubricante sólido 48 reducen significativamente o eliminan la fricción de adhesión y disminuyen la fricción de deslizamiento de modo que la pieza de trabajo 40 se autocentra suavemente hacia la cavidad con forma de V de la matriz 46.

Las figuras 4E y 4F muestran piezas de trabajo 40a y 40b forjadas, sin lubricante y con láminas de lubricante sólido 48, respectivamente. La pieza de trabajo 40a forjada mostrada en la figura 4E no se deforma uniformemente durante la forja sin lubricante y presenta abarrilamiento en 42a debido a la fricción relativamente alta entre la pieza de trabajo 40 y las matrices 44 y 46. La pieza de trabajo 40b forjada mostrada en la figura 4F se deforma más uniformemente durante la forja con las láminas de lubricante sólido 48 y presenta menor abarrilamiento en 42b debido a la fricción disminuida entre la pieza de trabajo 40 y las matrices 44 y 46.

Las figuras 5A y 5B ilustran operaciones de forja radial. La figura 5A muestra una operación de forja radial sin láminas de lubricante sólido y la figura 5B muestra una operación idéntica de forja radial empleando una lámina de lubricante sólido de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento. El diámetro de la pieza de trabajo cilíndrica 50 se reduce por las matrices 54 y 56 que se mueven en direcciones radiales con relación a la pieza trabajo 50, que se mueve longitudinalmente con relación a las matrices 54 y 56. Como se muestra en la figura 5A, la operación de forja radial realizada sin lubricante puede dar como resultado la deformación no uniforme como se indica en 52a. La operación de forja radial mostrada en la figura 5B se realiza con una lámina de lubricante sólido 58 envolviendo la pieza de trabajo 50 de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento. Por ejemplo, la pieza de trabajo

50 puede envolverse con la lámina de lubricante sólido 58 como se ilustra en la figura 2A o 2B, anterior. Como se muestra en la figura 5B, una operación de forja radial realizada con una lámina de lubricante sólido puede dar como resultado una deformación más uniforme como se indica 52b.

Las figuras 6A a 6D ilustran operaciones de forja de matriz cerrada, que pueden ser operaciones de forja de forma final o forma casi final. Las figuras 6A y 6C muestran una operación de forja de prensado de matriz cerrada sin láminas de lubricante sólido y las figuras 6B y 6D muestran una operación de forja idéntica empleando láminas de lubricante sólido de acuerdo con los procesos divulgados en el presente documento. Las matrices superiores o punzones 64 prensan las piezas de trabajo 60 en las cavidades de matriz de las matrices inferiores 66. La pieza de trabajo 60a mostrada en la figura 6C no se deforma uniformemente durante la forja sin lubricante y no rellena completamente las cavidades de la matriz, como se indica en 62, debido a la presión relativamente alta entre la pieza de trabajo 60 y la matriz interior 66. Esto puede ser particularmente problemático para operaciones de forja de matriz cerrada de forma final y forma casi final en las que la pieza de trabajo forjada se pretende que sea un artículo completamente formado o un artículo casi formado con poca o ninguna forja o mecanizado posterior.

Como se ilustra en la figura 6B, la pieza de trabajo 60 es envuelta en una lámina de lubricante sólido 68. La lámina de lubricante sólido 68 es flexible y se adapta a las superficies de la pieza de trabajo 60. La pieza de trabajo 60b mostrada en la figura 6D se deforma más uniformemente debido a la fricción disminuida debido a la lámina de lubricante sólido 68, y se adapta completamente a las superficies contorneadas y cavidades de las matrices 64 y 66 encerrados.

En diversas realizaciones, las láminas de lubricante sólido divulgadas en el presente documento pueden usarse en combinación con láminas aislantes separadas. Como se usa en el presente documento, una “lámina aislante” es una lámina de material sólido dirigida a aislar térmicamente una pieza de trabajo de las superficies de trabajo de las matrices en un aparato de forja. Por ejemplo, una lámina aislante puede situarse entre una lámina de lubricante sólido y una superficie de la pieza de trabajo, y/o puede posicionarse una lámina aislante entre una lámina de lubricante sólido y una superficie de la matriz. Además, puede intercalarse una lámina aislante entre dos láminas de lubricante sólido, y las láminas intercaladas posicionarse entre una pieza de trabajo y una matriz en un aparato de forja. Las figuras 7A a 7D ilustran diversas configuraciones de láminas de lubricante sólido 78 y láminas aislantes 75 con relación a piezas de trabajo 70 y matrices 74 y 76 en un aparato de forja.

La figura 7A ilustra una lámina lubricante sólido 78 posicionada sobre una superficie de trabajo de una matriz inferior 76. Se posiciona una pieza de trabajo 70 sobre la lámina de lubricante sólido 78 sobre la matriz inferior 76. En esta forma, la lámina de lubricante sólido 78 se posiciona entre una superficie inferior de la pieza de trabajo 70 y la matriz inferior 76. Se posiciona una lámina aislante 75 sobre la superficie superior de la pieza de trabajo 70.

La figura 7B muestra una lámina aislante 75 posicionada sobre la superficie de trabajo de una matriz inferior 76 en un aparato de forja de prensado. Una pieza de trabajo 70 se envuelve en una lámina de lubricante sólido 78. La pieza de trabajo 70 envuelta se posiciona sobre la lámina aislante 75 sobre la matriz inferior 76. En esta forma, se posicionan una lámina de lubricante sólido 78 y una lámina aislante 75 entre una superficie inferior de la pieza de trabajo 70 y una matriz inferior 76. Se posiciona una lámina aislante 75 entre la lámina de lubricante sólido 78 y la matriz inferior 76. Se posiciona otra lámina aislante 75 sobre la lámina de lubricante sólido 78 sobre una superficie superior de la pieza de trabajo 70. De esta forma, se posiciona también una lámina de lubricante sólido 78 y una lámina aislante 75 entre una superficie superior de la pieza de trabajo 70 y la matriz inferior 74. Se posiciona una lámina aislante 75 entre la lámina de lubricante sólido 78 y la matriz superior 74.

La figura 7C muestra láminas de lubricante sólido 78 posicionadas sobre superficies de trabajo tanto de la matriz superior 74 como de la matriz inferior 76. Se posiciona una lámina aislante 75 sobre la lámina de lubricante sólido 78 sobre la matriz inferior 76. La pieza de trabajo 70 se posiciona sobre la lámina aislante 75 de modo que tanto la lámina aislante 75 como la lámina de lubricante sólido 78 se posicionan entre la pieza de trabajo y la matriz inferior 76. Se posiciona otra lámina aislante 75 sobre una superficie superior de la pieza de trabajo 70 de modo que tanto una lámina aislante 75 como una lámina de lubricante sólido 78 se posicionan entre la pieza de trabajo y la matriz superior 74.

La figura 7D muestra láminas de lubricante sólido 78 posicionadas sobre superficies de trabajo tanto de la matriz superior 74 como de la matriz inferior 76. Se posiciona una lámina aislante 75 sobre la lámina de lubricante sólido 78 sobre la matriz inferior 76. Se envuelve una pieza de trabajo 70 en una lámina de lubricante sólido 78. La pieza de trabajo 70 se posiciona sobre la lámina aislante 75 de modo que se posicionen tres capas entre la pieza de trabajo 70 y la matriz inferior 76, es decir, una lámina de lubricante sólido 78, una lámina aislante 75 y otra lámina de lubricante sólido 78. Se posiciona otra lámina aislante 75 sobre la lámina de lubricante sólido sobre una superficie superior de la pieza de trabajo 70 de modo que se posicionen tres capas entre la pieza de trabajo 70 y la matriz superior 74, es decir una lámina de lubricante sólido 78, una lámina aislante 75 y otra lámina de lubricante sólido 78.

Aunque se describen e ilustran en el presente documento diversas configuraciones de láminas de lubricante sólido y láminas aislantes con relación a piezas de trabajo y matrices en un aparato de forja, las realizaciones de los procesos divulgados no se limitan a las configuraciones explícitamente divulgadas. Como tales, se contemplan por la presente divulgación diversas otras configuraciones de láminas de lubricante sólido y láminas aislantes con relación a piezas de trabajo y matrices. De la misma manera, aunque se han divulgado en el presente documento diversas técnicas y

combinaciones de técnicas para posicionamiento de láminas de lubricante sólido y/o láminas aislantes (tales como, por ejemplo, tendido, cobertura, envoltura, adhesión y similares), los procesos divulgados no se limitan a las técnicas de posicionamiento y combinaciones de técnicas de posicionamiento explícitamente divulgadas. Por ejemplo, pueden usarse diversas otras combinaciones de tendido, cobertura, envoltura, adhesión y similares para aplicar y posicionar láminas de lubricante sólido y/o láminas aislantes con relación a piezas de trabajo y matrices, antes y/o después de que se posicione una pieza de trabajo en un aparato de forja.

Las láminas aislantes pueden ser flexibles y capaces de ser posicionadas en cavidades y sobre contornos de superficies no planas de matrices de forja y/o piezas de trabajo. En diversas realizaciones, las láminas aislantes pueden comprender coberturas, mantas, papeles, fieltros, y similares tejidos o no tejidos de fibra cerámica. La lámina aislante puede consistir en fibras cerámicas (tal como, por ejemplo, fibras de óxido metálico) e impurezas residuales, y no contener aglomerantes o aditivos orgánicos. Por ejemplo, láminas aislantes adecuadas pueden comprender mezclas de fibras predominantemente de alúmina y sílice y menores cantidades de otros óxidos. Las láminas aislantes de fibra cerámica adecuadas para los procesos divulgados en el presente documento incluyen, por ejemplo, los diversos materiales Fiberfrax® disponibles en Unifrax, Niagara Falls, Nueva York, Estados Unidos.

En diversas realizaciones, pueden posicionarse estructuras intercaladas que comprenden múltiples láminas de lubricante sólido entre una pieza de trabajo y una matriz en un aparato de forja. Por ejemplo, una estructura intercalada que comprenda dos o más capas de láminas de lubricante sólido puede posicionarse entre una pieza de trabajo y una matriz en un aparato de forja. Las estructuras intercaladas pueden comprender también una o más láminas aislantes. Además, pueden aplicarse múltiples láminas de lubricante sólido para cubrir grandes áreas. Por ejemplo, pueden aplicarse dos o más láminas de lubricante sólido a matrices y/o piezas de trabajo para cubrir mayor área superficial que lo que pueden cubrir láminas de lubricante sólido individuales. En esta forma, pueden aplicarse dos o más láminas de lubricante sólido a una matriz y/o una pieza de trabajo de una forma solapada o no solapada.

Los procesos de lubricación divulgados en el presente documento pueden aplicarse a operaciones de forja frías, templadas y calientes a cualquier temperatura. Por ejemplo, puede posicionarse una lámina de lubricante sólido entre una pieza de trabajo y una matriz en un aparato de forja en el que la forja tiene lugar a temperatura ambiente. Alternativamente, las piezas de trabajo y/o matrices pueden calentarse antes o después del posicionamiento de la lámina de lubricante sólido entre las piezas de trabajo y las matrices. En diversas realizaciones. Una matriz en un aparato de forja puede calentarse con una antorcha tanto antes como después de que se aplique una lámina de lubricante sólido a la matriz. Una pieza de trabajo puede calentarse en un horno tanto antes como después de que se aplique una lámina de lubricante sólido a la pieza de trabajo.

En diversas realizaciones, una pieza de trabajo puede deformarse plásticamente mientras la pieza de trabajo está a una temperatura mayor de 538 °C (1000 °F), en el que la lámina de lubricante sólido mantiene la lubricidad a la temperatura. En diversas realizaciones, una pieza de trabajo puede deformarse plásticamente mientras la pieza de trabajo está a una temperatura en el intervalo de 538 °C (1000 °F) a 1093 °C (2000 °F), o cualquier subintervalo en él, tal como, por ejemplo, 538 °C (1000 °F) a 871 °C (1600 °F) o 649 °C (1200 °F) a 815 °C (1500 °F), en el que la lámina de lubricante sólido mantiene la lubricidad a la temperatura.

Los procesos divulgados en el presente documento proporcionan un método robusto para lubricación de forja. En diversas realizaciones, las láminas de lubricante sólido pueden depositar un recubrimiento lubricante sólido sobre las matrices durante una operación de forja inicial. Los recubrimientos de lubricante sólido depositado pueden sobrevivir a la operación de forja inicial y a una o más operaciones de forja posteriores. Los recubrimientos de lubricante sólido supervivientes sobre las matrices mantienen la lubricidad y pueden proporcionar una lubricación de forja efectiva sobre una o más operaciones de forja adicionales sobre la misma pieza de trabajo y/o diferentes piezas de trabajo sin necesidad de aplicar láminas de lubricante sólido adicionales.

En diversas realizaciones, puede posicionarse una lámina de lubricante sólido entre una pieza de trabajo y la matriz antes de que una primera operación de forja deposite un recubrimiento lubricante sólido sobre la matriz, y pueden aplicarse láminas de lubricante sólido adicionales después de un número predeterminado de operaciones de forja. De esta forma, puede establecerse un ciclo de trabajo para una aplicación de láminas de lubricante sólido en términos del número de operaciones de forja que pueden realizarse sin aplicaciones adicionales de láminas de lubricante sólido mientras se mantiene una lubricidad aceptable y lubricación de la forja. Podrán aplicarse a continuación láminas de lubricante sólido adicionales después de cada ciclo de trabajo. En diversas realizaciones, las láminas de lubricante sólido iniciales pueden ser relativamente gruesas para depositar un recubrimiento de lubricante sólido inicial sobre las matrices, y las láminas de lubricante sólido aplicadas posteriormente pueden ser relativamente delgadas para mantener el recubrimiento de lubricante sólido depositado.

Los procesos divulgados en el presente documento son aplicables a la forja de diversos materiales metálicos, tales como, por ejemplo, titanio, aleaciones de titanio, circonio y aleaciones de circonio. Además, los procesos divulgados en el presente documento son aplicables a la forja de materiales intermetálicos, materiales deformables no metálicos, y sistemas multi-componente, tales como, por ejemplo, cerámicas encapsuladas en metal. Los procesos divulgados en el presente documento son aplicables a la forja de diversos tipos de piezas de trabajo, tales como, por ejemplo, lingotes, tochos, barras, placas, tubos, preformas sinterizadas, y similares. Los procesos divulgados en el presente

documento son aplicables también a forja de forma final y forma casi final de artículos formados o casi formados.

En diversas realizaciones, los procesos de lubricación divulgados en el presente documento pueden caracterizarse por factores de fricción de cortadura (m) menores que o iguales a 0,50, menores que o iguales a 0,45, menores que o iguales a 0,40, menores que o iguales a 0,35, menores que o iguales a 0,30, menores que o iguales a 0,25, menores que o iguales a 0,20, menos que o iguales a 0,15, o menores que o iguales a 0,10. En diversas realizaciones, los procesos de lubricación divulgados en el presente documento pueden caracterizarse por factores de cortadura en el intervalo de 0,05 a 0,50 o cualquier subintervalo en ellos, tal como, por ejemplo, 0,09 a 0,15. Como tales, los procesos de lubricación divulgados en el presente documento disminuyen sustancialmente la fricción entre matrices y piezas de trabajo en operaciones de forja.

En diversas realizaciones, los procesos de lubricación divulgados en el presente documento pueden disminuir o eliminar la incidencia de bloqueos de la matriz, adhesión, y/o corrosión por fricción de las piezas de trabajo en operaciones de forja. Los lubricantes líquidos o en partículas no son fácilmente aplicados cuando también se usan láminas aislantes en operaciones de forja, pero los procesos de lubricación divulgados permiten el uso simultáneo de láminas aislantes, lo que disminuye sustancialmente las pérdidas térmicas de piezas de trabajo a matrices. Los lubricantes líquidos o en partículas también tienden a diluirse sobre las superficies de las matrices y piezas de trabajo y dispersarse después de cada operación de forja, pero las láminas de lubricante sólido pueden crear una barrera estable entre matrices y piezas de trabajo en operaciones de forja. Los lubricantes de estado sólido, tales como, por ejemplo, grafito, disulfuro de molibdeno, disulfuro de tungsteno y nitruro de boro, son también en general químicamente inertes y no abrasivos con respecto a las matrices metálicas y piezas de trabajo en las condiciones de forja.

En diversas realizaciones, puede eliminarse el lubricante sólido depositado sobre matrices y piezas de trabajo a partir de las láminas de lubricante sólido durante las operaciones de forja. Por ejemplo, el grafito depositado puede eliminarse fácilmente de las superficies de las matrices y piezas de trabajo mediante calentamiento en una atmósfera oxidante, tal como, por ejemplo, en un horno. El lubricante sólido depositado puede eliminarse también mediante un procedimiento de lavado.

Los ejemplos ilustrativos y no limitativos que siguen están dirigidos a describir adicionalmente diversas realizaciones no limitativas sin restringir el alcance de las realizaciones. Los expertos en la materia apreciarán que son posibles variaciones de los ejemplos dentro del alcance de la invención tal como se define por las reivindicaciones.

Ejemplos

Ejemplo 1

Se usó un ensayo de compresión en anillo para evaluar la lubricidad de láminas de grafito sólido y su efectividad como lubricante para forja de prensado de matriz abierta de una aleación Ti-6Al-4V (ASTM grado 5). El ensayo de compresión en anillo se describe en general, por ejemplo, en Atlan et al., Metal Forming: Fundamentals and Applications, Ch.6. Friction in Metal Forming, ASM: 1993. La lubricidad, cuantificada como el factor de cortadura (m) de un sistema, se mide usando un ensayo de compresión en anillo en el que se comprime la muestra con forma de anillo plano hasta una reducción predeterminada en altura. El cambio en el diámetro interior y exterior del anillo comprimido depende de la fricción de la interfaz matriz/muestra.

La configuración general de un ensayo de compresión en anillo se muestra en la figura 8. Se posiciona un anillo 80 (mostrado en sección transversal) entre dos matrices 84 y 86 y se comprime axialmente desde una altura inicial a una altura deformada. Si no existe ninguna fricción entre el anillo 80 y las matrices 84 y 86, el anillo 80 se deformaría como un disco sólido con el material fluyendo radialmente hacia el exterior desde el plano neutro 83 a una tasa constante a lo largo de la dirección axial como se indica por las flechas 81. El anillo se muestra antes de la compresión en la figura 9(a). No ocurriría ningún abarrilamiento para una compresión sin fricción o mínima fricción (figura 9(b)). El diámetro interior de un anillo comprimido se incrementa si la fricción es relativamente baja (figura 9(c)) y disminuyese si la fricción es relativamente alta (figuras 9(d) y 9(e)). La figura 10A muestra una muestra de anillo seccionada 100 antes de la compresión, la figura 10B muestra el anillo 100 comprimido bajo condiciones de fricción relativamente bajas, y la figura 10C muestra el anillo 100 comprimido bajo condiciones de fricción relativamente altas.

El cambio en el diámetro interior de un anillo comprimido, medido entre el vértice del saliente interior del abarrilamiento, se compara con valores del diámetro interior predicho usando diversos factores de cortadura. Las correlaciones entre el diámetro interior comprimido y el factor de cortadura pueden determinarse, por ejemplo, usando métodos de cálculo de elementos finitos (FEM) simulando el flujo de metal en la compresión del anillo con abarrilamiento para materiales predeterminados bajo condiciones de forja predeterminadas. De esta forma, puede determinarse el factor de cortadura para un ensayo de compresión en anillo que caracteriza la fricción, y por extensión, la lubricidad del sistema ensayado.

Se usaron anillos de aleación de Ti-6Al-4V (ASTM grado 5) que tenían un diámetro interior de 3,175 cm (1,25 pulgadas), un diámetro exterior de 6,35 cm (2,5 pulgadas), y una altura de 2,54 cm (1,00 pulgadas) (figuras 11A y 11B) para el ensayo de compresión en anillo. Los anillos se calentaron a una temperatura en el intervalo de 649 °C (1200 °F) - 815 °C (1500 °F) y se comprimieron en un aparato de forja de prensado de matriz abierta hasta una altura

deformada de 1,27 cm (0,50 pulgadas). La correlación entre el diámetro interior comprimido (ID) y el factor de cortadura (m) se determinó usando un software de simulación del proceso de formación metálica DEFORM™, disponible en Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio, Estados Unidos. La correlación se muestra en el gráfico presentado en la figura 12.

Los anillos se comprimieron (1) matrices entre 204 °C (400 °F) - 315 °C (600 °F) sin lubricante, (2) matrices entre 204 °C (400 °F) - 315 °C (600 °F) con un lubricante de vidrio (frita de vidrio ATP300 disponible en Advanced Technical Products, Cincinnati, Ohio, Estados Unidos), (3) matrices entre 815 °C (1500 °F) sin lubricante, (4) matrices entre 815 °C (1500 °F) con un lubricante de vidrio y (5) matrices entre 204 °C (400 °F) - 315 °C (600 °F) con láminas de lubricante sólido (lámina de grafito grado B (> 98 % de grafito en peso) disponible en DAR Industrial Products, Inc., West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos). El lubricante de vidrio, cuando se usó, se aplicó a la superficie superior de la matriz inferior y a la superficie superior del anillo colocando y suavizando una capa de frita de vidrio antes de calentar el anillo a la temperatura de forja en un horno. Las láminas de lubricante sólido, cuando se usaron, se depositaron entre la matriz inferior y la superficie del fondo del anillo, y sobre la superficie superior del anillo. Los diámetros interiores comprimidos y factores de cortadura correspondientes se indican en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1

	Condiciones	ID (cm)	Factor de cortadura
1	Matrices a 204-315 °C sin lubricante	1.19	> 0,6
2	Matrices a 204-315 °C lubricante de vidrio	1,19	> 0,6
3	Matrices a 815 °C sin lubricante	1,30	> 0,6
4	Matrices a 815 °C lubricante de vidrio	3,20, 3,50	0,14, 0,10
5	Matrices a temperatura ambiente, láminas de lubricante sólido	3,48	0,10

Los diámetros interiores de los anillos comprimidos bajo las condiciones 1 y 2 disminuyeron en un 62,4 %, y el diámetro interior del anillo comprimido bajo la condición 3 disminuyó en un 59,2 %. Esto indica una fricción muy alta entre los anillos y las matrices. Para este sistema, los factores de cortadura mayores de 0,6 son difíciles de determinar con precisión usando el ensayo de compresión en anillo debido a que la correlación entre el factor de cortadura y el diámetro interior se aproxima a una asíntota más allá de aproximadamente m=0,6. Sin embargo, la significativa disminución en los diámetros interiores de los anillos comprimidos bajo las condiciones 1-3 indica que 0,6 es el factor de cortadura más bajo posible para estas condiciones, y es probable que los factores de cortadura reales sean mayores de 0,6.

Los diámetros interiores de los anillos comprimidos bajo las condiciones 4 y 5 se incrementaron, lo que indica una fricción significativamente reducida correspondiente a factores de cortadura de aproximadamente 0,1. Las láminas de lubricante sólido proporcionaron lubricación que fue comparable a, o mejor que, la lubricación proporcionada por lubricantes de vidrio. La elevada lubricidad (m=0,1) a temperaturas elevadas fue inesperada y sorprendente debido a que es conocido que la lubricidad del grafito disminuye significativamente a temperaturas elevadas. Generalmente, el coeficiente de fricción (μ) del grafito comienza a incrementarse rápidamente por encima de aproximadamente 371 °C (700 °F). De esa forma, se esperaba que el factor de cortadura (m) de las láminas de grafito sólido fuera significativamente mayor que 0,1 entre matrices fríos y anillos a una temperatura en el intervalo de 640 °C (1200 °F) - 815 °C (1500 °F).

La efectividad de las láminas de lubricante sólido es también significativa debido a que los lubricantes de vidrio pueden tener un cierto número de inconvenientes cuando se usan en operaciones de forja. Por ejemplo, los lubricantes de vidrio deben estar en un estado molido y tener una viscosidad suficientemente baja para proporcionar lubricación entre superficies sólidas. Como tales, los lubricantes de vidrio pueden no proporcionar lubricidad efectiva a temperaturas de forja por debajo de 815 °C (1500 °F), o cuando están en contacto con matrices fríos. Ciertos métodos para disminuir la temperatura de vitrificación de vidrios emplean metales tóxicos, tales como plomo. Los lubricantes de vidrio que contienen metales tóxicos pueden considerarse inadecuados como lubricantes de forja. El lubricante de vidrio también debe rociarse sobre la pieza de trabajo usando equipos especializados antes del calentamiento de la pieza de trabajo para forja. Los lubricantes de vidrio deben mantener un estado molido a todo lo largo de la operación de forja, lo que limita el grosor de los recubrimientos de lubricante de vidrio que pueden depositarse sobre piezas de trabajo antes de la forja.

Adicionalmente, la alta temperatura de vidrios molidos interfiere con el transporte y manejo de las piezas de trabajo. Por ejemplo, la empuñadura usada para sujetar y manipular las piezas de trabajo calientes mientras se transportan de los hornos de calentamiento o equipos de aplicación de lubricante a los aparatos de forja frecuentemente se deslizan sobre las piezas de trabajo lubricadas con vidrio a alta temperatura. Adicionalmente, los lubricantes de vidrio pueden solidificar sobre artículos de enfriamiento después de la forja, y el vidrio solidificado quebradizo puede tensarse y el vidrio solidificado puede fracturarse de modo forzado y estallar en los artículos forjados en piezas. Además, el lubricante de vidrio residual que solidifica sobre superficies enfriadas después de la forja debe eliminarse por métodos mecánicos que pueden reducir los rendimientos de la forja y pueden producir restos de materiales contaminados.

Las láminas de lubricante sólido superan los problemas anteriores con los lubricantes de vidrio. Las láminas de lubricante sólido mantienen un estado sólido a todo lo largo de las operaciones de forja y pueden aplicarse antes o después del calentamiento de matrices y/o piezas de trabajo. Las láminas de lubricante sólido no requieren ninguna aplicación especializada o técnicas de manejo, y pueden posicionarse a mano, lo que permite una aplicación más controlada y/o dirigida. Los lubricantes de estado sólido residuales pueden ser fácilmente eliminados usando calentamiento en horno y/o procedimientos de lavado. Las láminas de lubricante sólido pueden aplicarse directamente a matrices antes de que se coloquen las piezas de trabajo en los aparatos de forja. Las láminas de lubricante sólido pueden aplicarse directamente a piezas de trabajo después de la colocación en los aparatos de forja. Además, las láminas de lubricante sólido pueden ser flexibles y/o dúctiles y, por lo tanto, es significativamente menos probable que salten en astillas desde los artículos enfriados después de la forja.

Ejemplo 2

Se forjó por prensado un tocho cilíndrico de aleación de Ti-6Al-4V (ASTM grado 5) en una forja de prensado de matriz abierta de 1000 toneladas equipada con matrices con forma de V, con y sin láminas de lubricante sólido. El tocho se calentó en un horno a 704 °C (1300 °F). Las matrices de la forja de prensa se calentaron con una antorcha a 204 °C (400 °F) - 315 °C (600° F). El tocho se sacó del horno con un manipulador y se colocó sobre la matriz con forma de V inferior. Debido a las restricciones del manipulador, el tocho se colocó descentrado con relación al contorno con forma de V de la matriz inferior. Para las operaciones de forja usando láminas de lubricante sólido, se posicionó una lámina de grafito grado HGB (99 % de grafito en peso, disponible en HP Materials Solutions, Inc., Woodland Hills, California, Estados Unidos) sobre la matriz inferior justamente antes de que se posicionara el tocho sobre la matriz. Se posicionó una segunda lámina de lubricante sólido sobre la superficie superior del tocho. De esa forma, se posiciona una lámina de lubricante sólido entre el tocho y tanto la matriz inferior como la matriz superior en la forja de prensa.

Durante el forjado de prensa del tocho sin lubricante, se observó que el tocho bloqueó la matriz en la matriz inferior hasta que la fuerza producida por la presión superó la fricción, en cuyo punto el tocho aceleró rápidamente hacia el contorno con forma de V de la matriz inferior, produciendo un fuerte sonido y sacudiendo toda la forja de prensa. Durante el forjado de prensa del tocho con una lámina de lubricante sólido, se observó una acción de autocentrado en el que el tocho se movió suavemente al contorno con forma de V de la matriz inferior sin ningún bloqueo de la matriz, aceleración rápida, sonidos fuertes o sacudida de la forja de prensa.

La lámina de grafito sólido inicial depositó un recubrimiento de grafito sólido sobre la matriz inferior durante la operación de forja inicial. El recubrimiento de grafito depositado sobrevivió a la operación de prensado inicial y a múltiples operaciones de prensado posteriores. El recubrimiento de grafito depositado mantuvo la lubricidad y proporcionó lubricación de forja efectiva a lo largo de múltiples operaciones de prensado en diferentes partes del tocho sin necesidad de aplicar láminas de grafito sólido adicional. Una única lámina de grafito sólido inicial impidió el bloqueo de la matriz para operaciones de prensado posteriores.

La presente divulgación se ha escrito con referencia a diversas realizaciones de ejemplo, ilustrativas y no limitativas. Sin embargo, se reconocerá por los expertos en la materia que pueden realizarse diversas sustituciones, modificaciones o combinaciones de cualquiera de las realizaciones divulgadas (o de parte de las mismas) sin apartarse del alcance de la invención tal como se define por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso de lubricación de forja que comprende:

posicionar una lámina de lubricante sólido (28, 38, 48, 58, 68, 78) entre una pieza de trabajo (20, 30, 40, 50, 60, 70) y una matriz (34, 36, 44, 46, 54, 56, 64, 66, 74, 76) en un aparato de forja y aplicar fuerza a la pieza de trabajo para deformar plásticamente la pieza de trabajo,
caracterizado por que la lámina de lubricante sólido consiste en al menos un material lubricante de estado sólido e impurezas residuales, en donde el al menos un material lubricante en estado sólido se selecciona dentro del grupo que consiste en grafito, disulfuro de molibdeno, disulfuro de tungsteno y nitruro de boro.

2. El proceso de la reivindicación 1, en el que la lámina de lubricante sólido es una lámina de grafito sólido que consiste en grafito e impurezas residuales.

3. El proceso de la reivindicación 2, en el que:

la pieza de trabajo comprende titanio, una aleación de titanio, circonio o una aleación de circonio;
la pieza de trabajo está a una temperatura en el intervalo de 538 °C (1000 °F) a 1093 °C (2000 °F) durante la deformación; y
un factor de cortadura entre la matriz y la pieza de trabajo durante la deformación es menor de 0,50.

4. El proceso de la reivindicación 3, en el que:

la pieza de trabajo comprende una aleación de titanio;
la pieza de trabajo está a una temperatura en el intervalo de 538 °C (1000 °F) a 871 °C (1600 °F) durante la deformación; y
un factor de cortadura entre las matrices y la pieza de trabajo durante la forja está en el intervalo de 0,09 a 0,20.

5. El proceso de la reivindicación 2, en el que el posicionamiento de una lámina de grafito sólido entre una pieza de trabajo y una matriz en un aparato de forja comprende:

posicionar la lámina de grafito sólido sobre una superficie superior de una matriz inferior; y
posicionar la pieza de trabajo sobre la lámina de grafito sólido,
en el que la lámina de grafito sólido se posiciona entre una superficie inferior de la pieza de trabajo y la superficie superior de la matriz inferior en el aparato de forja.

6. El proceso de la reivindicación 5, que comprende además posicionar una lámina de grafito sólido adicional sobre una superficie superior de la pieza de trabajo.

7. El proceso de la reivindicación 2, que comprende además calentar la matriz antes de que se posicione la lámina de grafito sólido entre la pieza de trabajo y la matriz en el aparato de forja.

8. El proceso de la reivindicación 2, en el que la pieza de trabajo se deforma plásticamente en una operación de forja seleccionada entre el grupo que consiste en forja de matriz abierta, forja de matriz cerrada, extrusión directa, extrusión posterior, forja radial, forja por recalcado y forja por embutición.

9. El proceso de la reivindicación 2, en el que la pieza de trabajo se deforma plásticamente en una operación de forja de matriz cerrada en uno de entre un proceso de forja de forma casi final y un proceso de forja de forma final.

10. El proceso de la reivindicación 2 que comprende además eliminar el grafito sólido residual de la pieza de trabajo después de que se deforme plásticamente la pieza de trabajo.

11. El proceso de la reivindicación 2, en el que la lámina de grafito sólido comprende una forma preformada que coincide con una forma de la matriz.

12. El proceso de la reivindicación 2, en el que el posicionamiento de una lámina de grafito sólido entre una pieza de trabajo y una matriz en un aparato de forja de matriz cerrada comprende:

envolver la pieza de trabajo en una lámina de grafito sólido, en donde la lámina de grafito sólido es flexible y se adapta a las superficies de la pieza de trabajo; e
insertar la pieza de trabajo en la cavidad de la matriz,
en el que la pieza de trabajo se deforma más uniformemente y se adapta completamente a las superficies contorneadas y las cavidades de la matriz.

13. El proceso de la reivindicación 1, en el que el posicionamiento de una lámina de lubricante sólido entre una pieza de trabajo y una matriz en un aparato de forja comprende:

posicionar la lámina de lubricante sólido sobre la superficie superior de la matriz inferior; y
posicionar la pieza de trabajo sobre la lámina de lubricante sólido,
en el que la lámina de lubricante sólido se posiciona entre una superficie inferior de la pieza de trabajo y una superficie superior de la matriz inferior en el aparato de forja.

14. El proceso de la reivindicación 13, que comprende además posicionar una lámina de lubricante sólido adicional sobre una superficie superior de la pieza de trabajo.

15. El proceso de la reivindicación 1, que comprende además calentar la matriz antes de que se posicione la lámina de lubricante sólido entre la pieza de trabajo y la matriz en el aparato de forja.

16. El proceso de la reivindicación 1, en el que la pieza de trabajo se deforma plásticamente en una operación de forja seleccionada entre el grupo que consiste en forja de matriz abierta, forja de matriz cerrada, extrusión directa, extrusión posterior, forja radial, forja por recalcado y forja por embutición.

17. El proceso de la reivindicación 1, en el que la pieza de trabajo se deforma plásticamente en una operación de forja de matriz cerrada en uno de entre un proceso de forja de forma casi final y un proceso de forja de forma final.

18. El proceso de la reivindicación 1, en el que la pieza de trabajo comprende una aleación de titanio.

19. El proceso de la reivindicación 1, en el que la pieza de trabajo comprende una aleación de circonio.

20. El proceso de la reivindicación 1, que comprende además retirar el lubricante sólido residual de la pieza de trabajo después de que se deforme plásticamente la pieza de trabajo.

21. Proceso de la reivindicación 1, en el que la lámina de lubricante sólido comprende una forma preformada que se adapta a la forma de la matriz.

22. El proceso de la reivindicación 21, en el que la pieza de trabajo se deforma plásticamente en una operación de forja de matriz cerrada en uno de entre un proceso de forja de forma casi final y un proceso de forja de forma final.

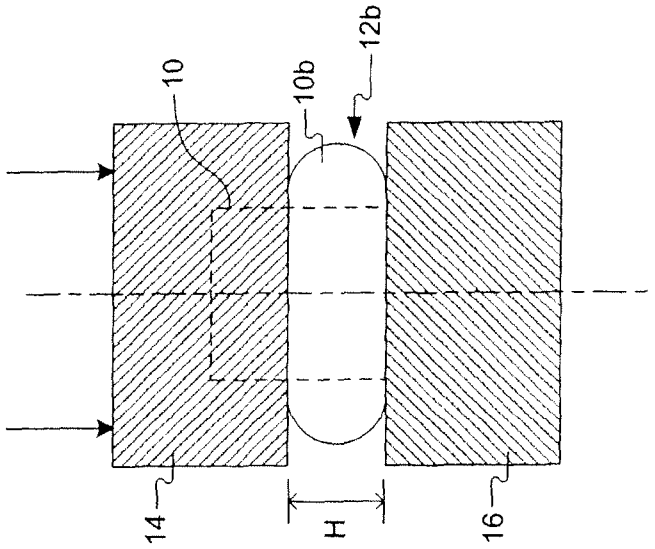

FIG. 1B

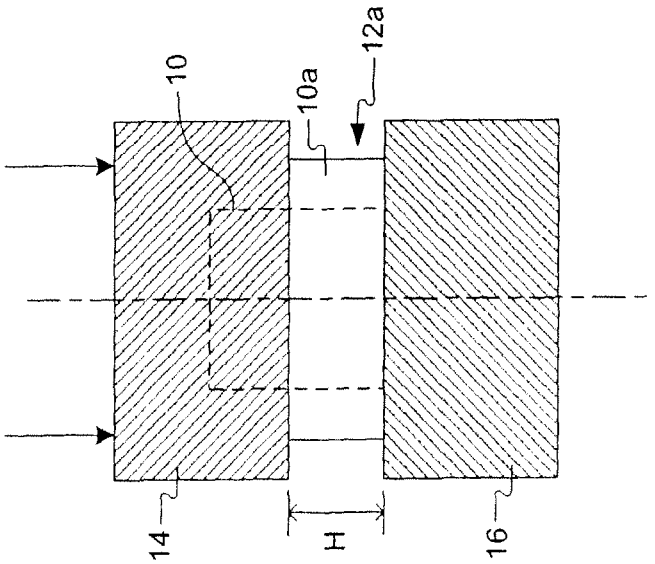

FIG. 1A

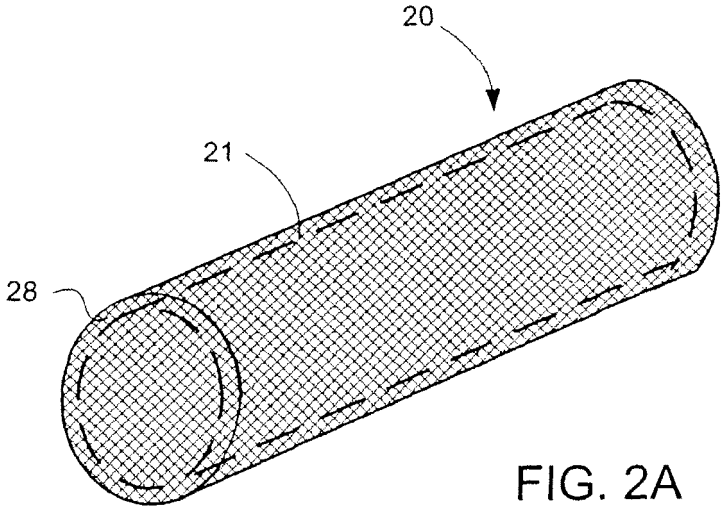

FIG. 2A

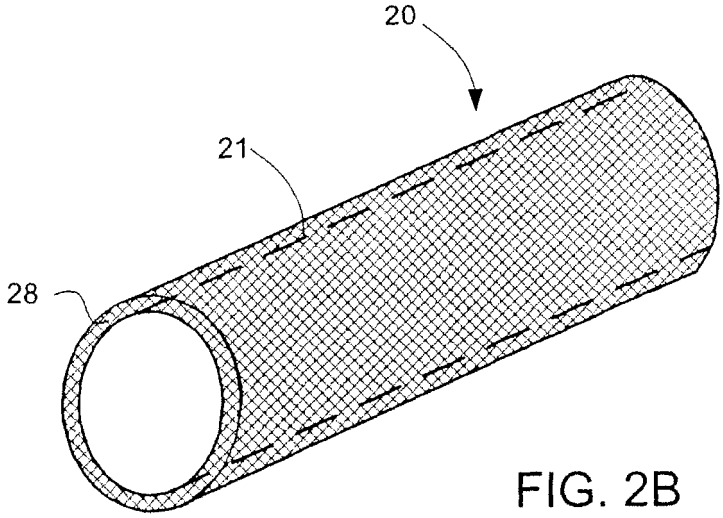

FIG. 2B

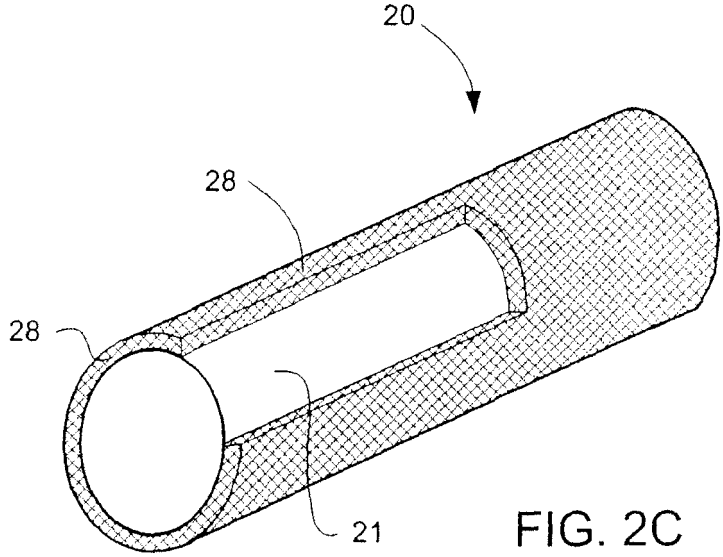

FIG. 2C

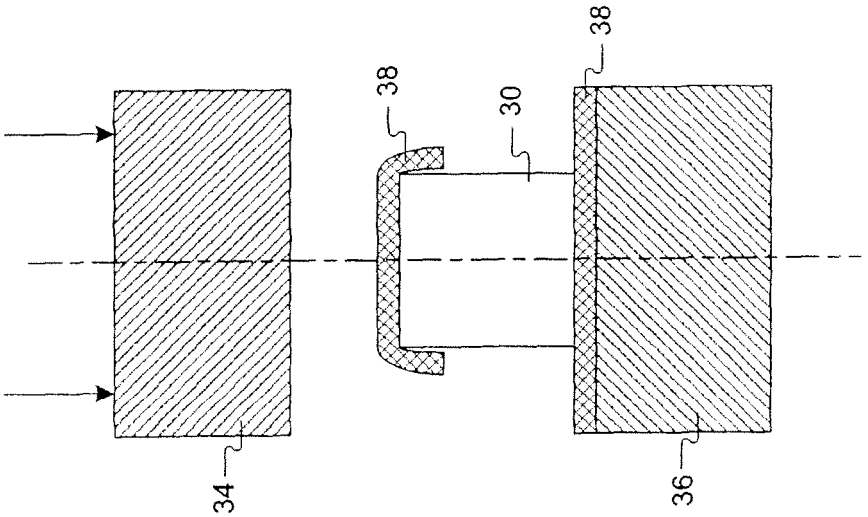

FIG. 3B

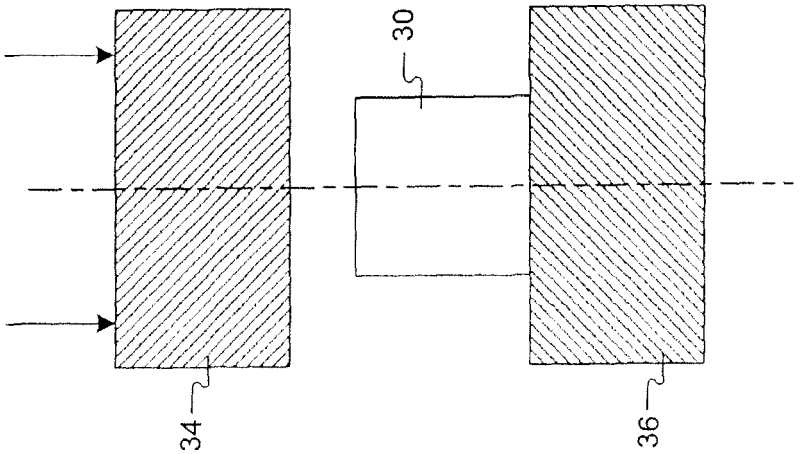

FIG. 3A

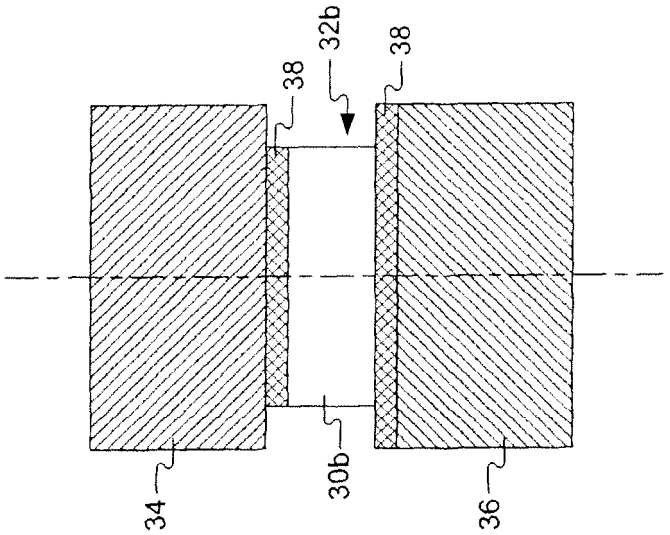

FIG. 3D

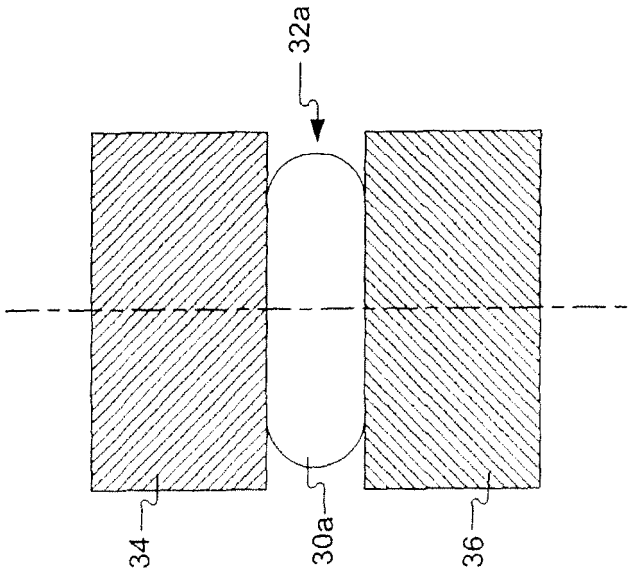

FIG. 3C

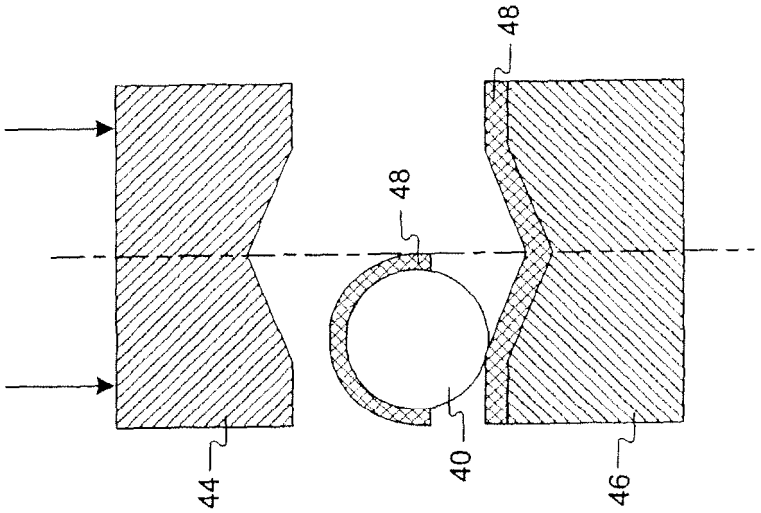

FIG. 4B

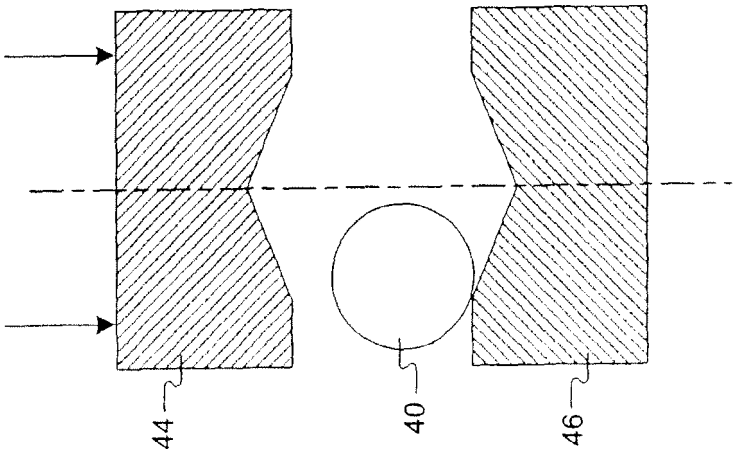

FIG. 4A

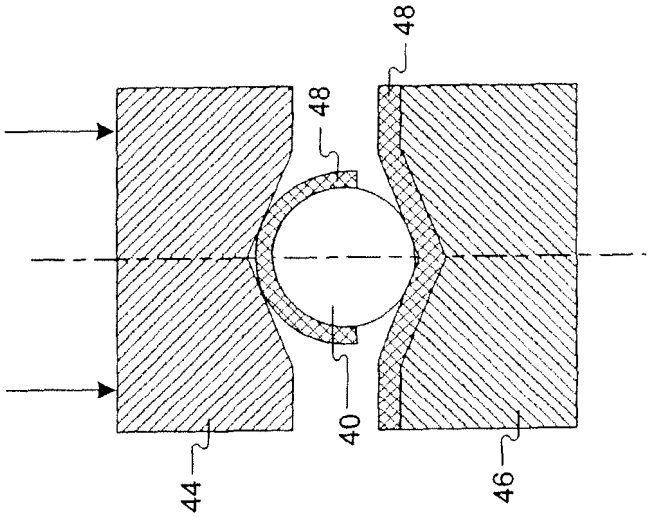

FIG. 4D

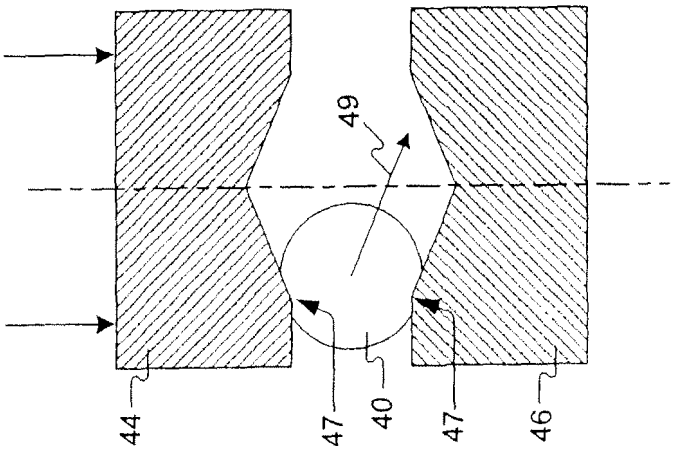

FIG. 4C

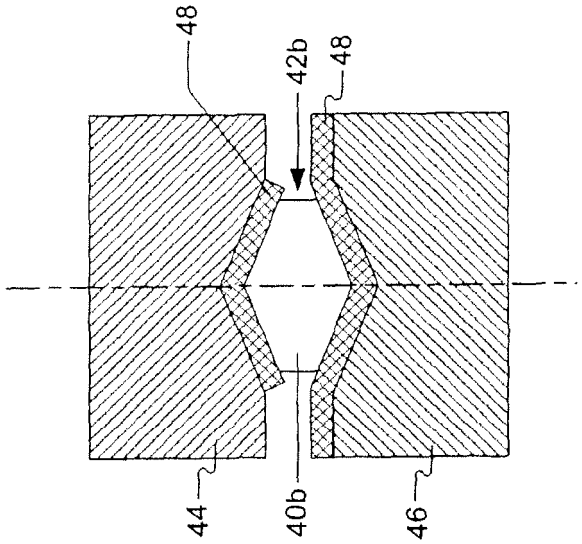

FIG. 4F

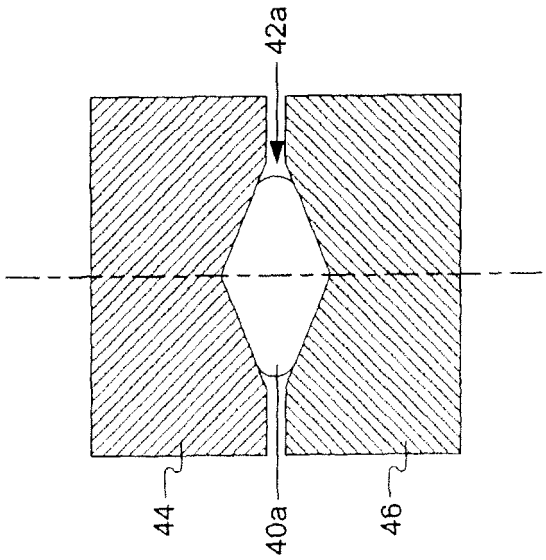

FIG. 4E

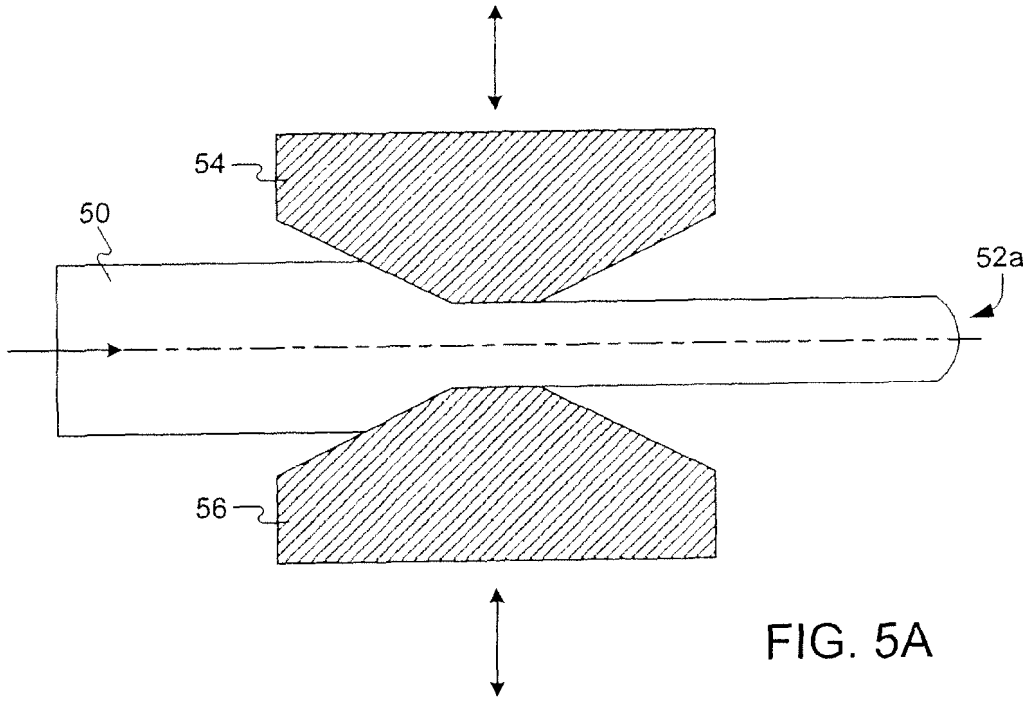

FIG. 5A

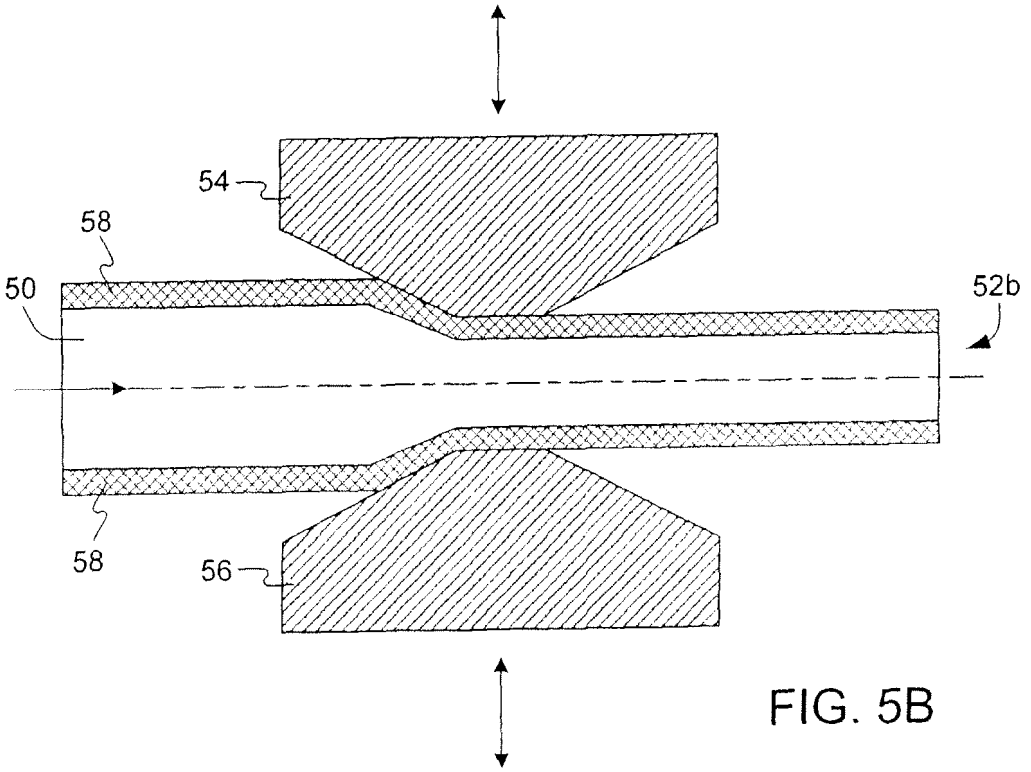

FIG. 5B

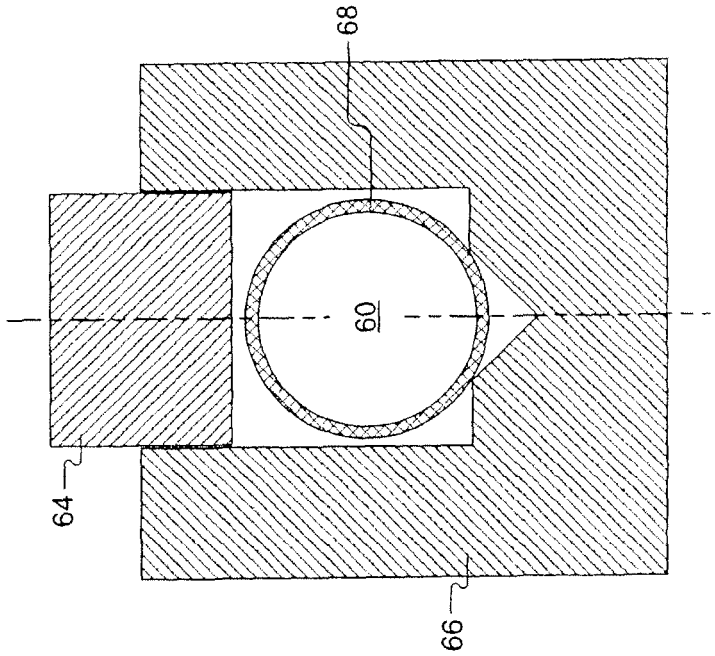

FIG. 6B

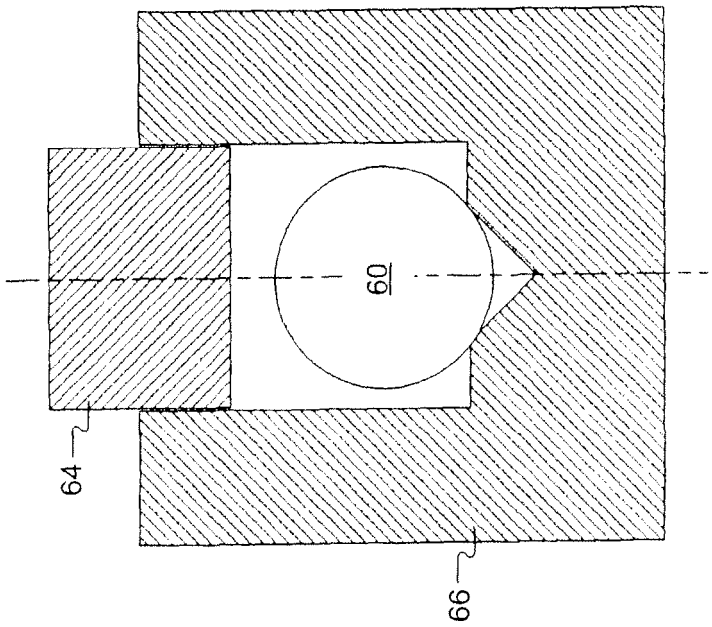

FIG. 6A

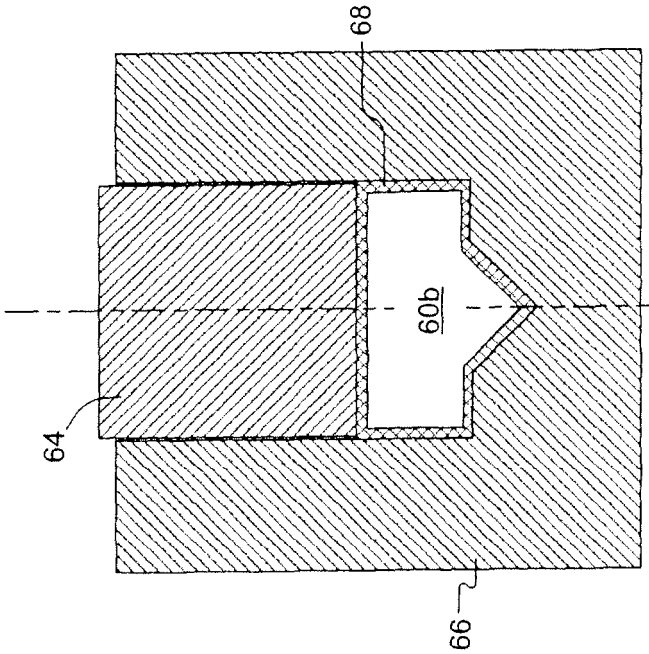

FIG. 6D

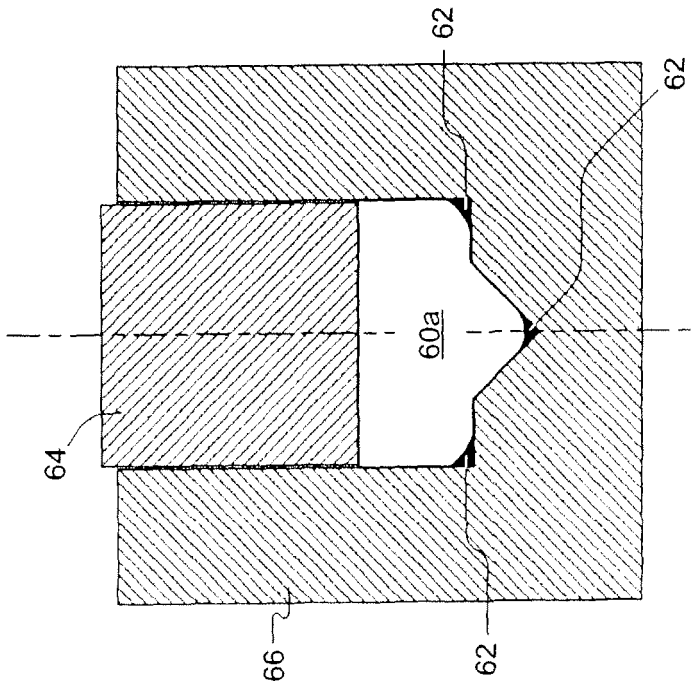

FIG. 6C

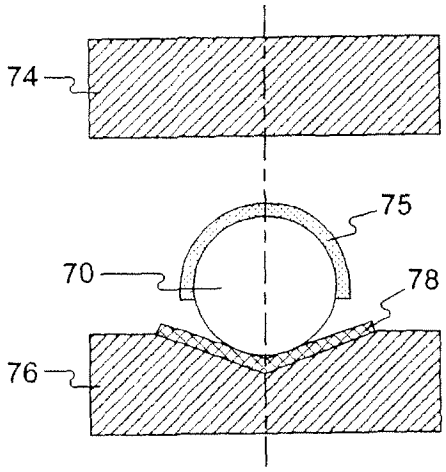

FIG. 7A

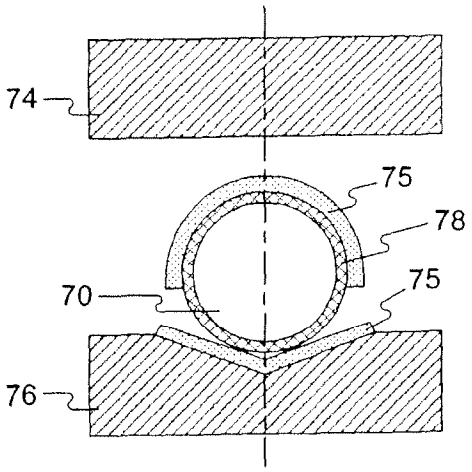

FIG. 7B

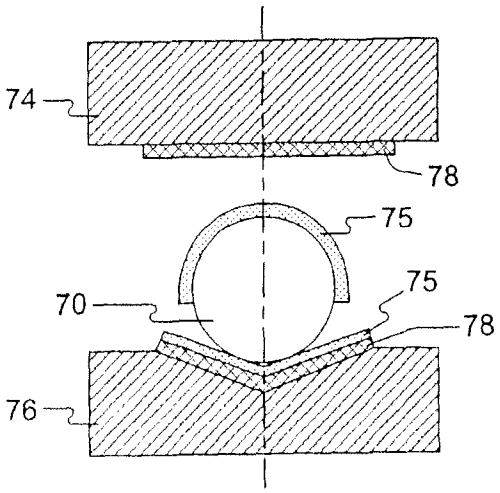

FIG. 7C

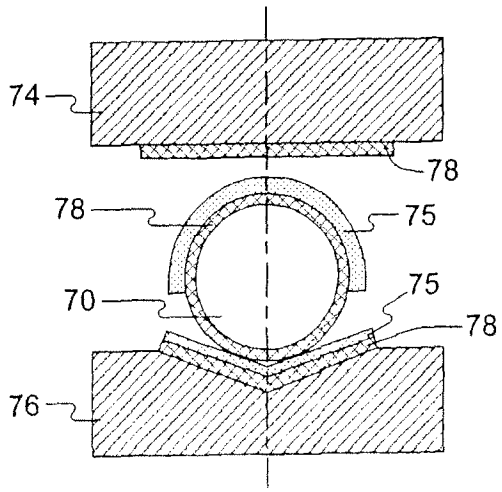

FIG. 7D

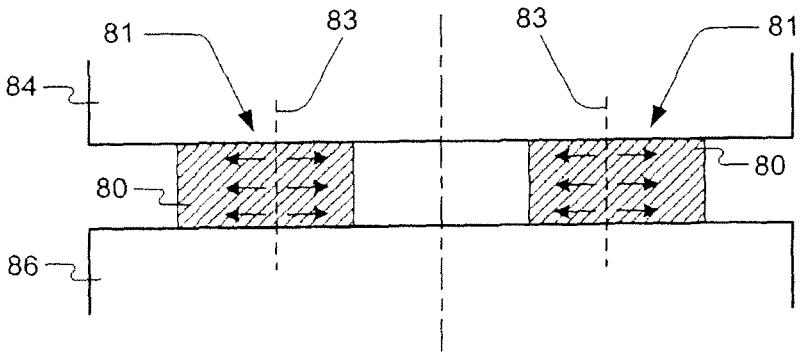
81
83
83
81
84
80
80
86

FIG. 8

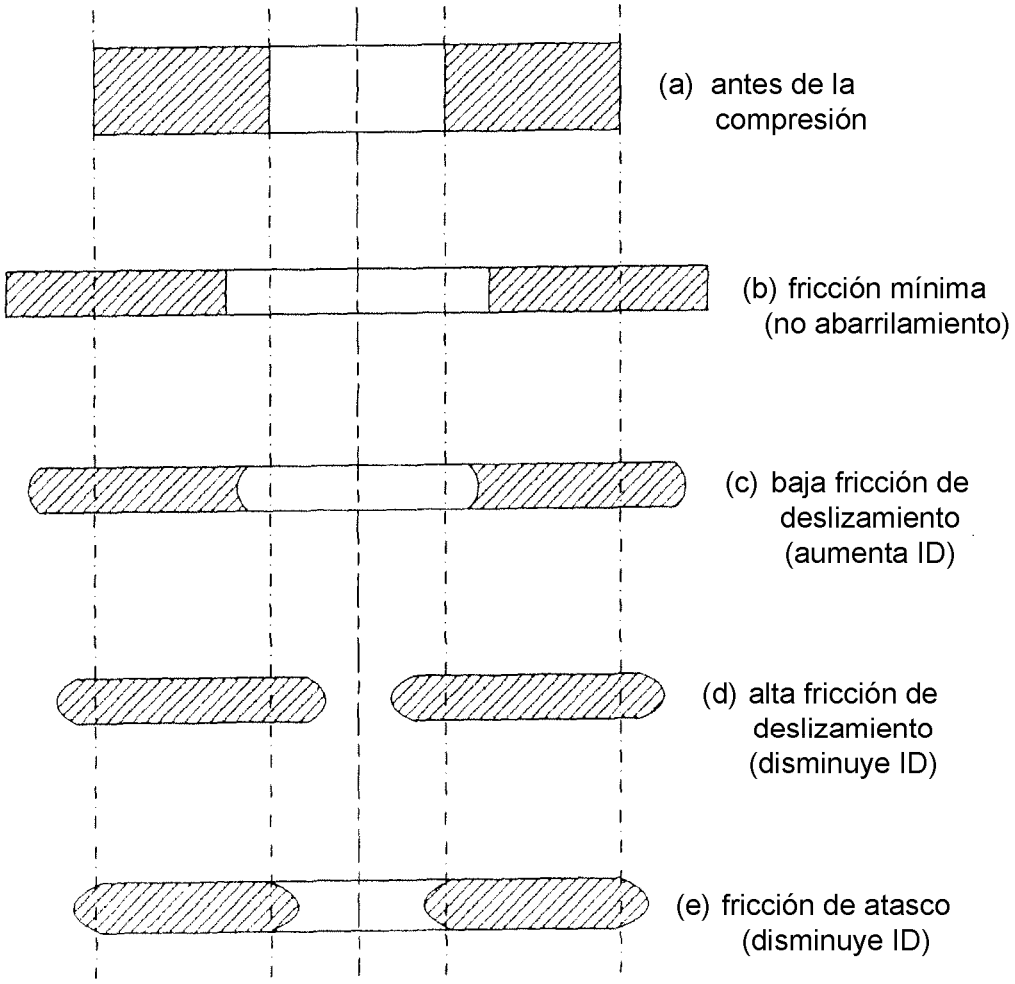
(a) antes de la compresión
(b) fricción mínima (no abarrilamiento)
(c) baja fricción de deslizamiento (aumenta ID)
(d) alta fricción de deslizamiento (disminuye ID)
(e) fricción de atasco (disminuye ID)

FIG. 9

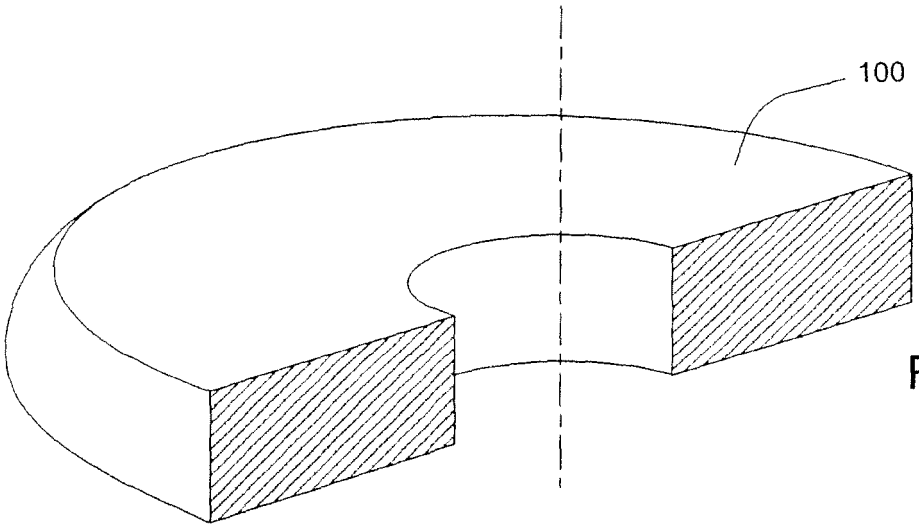

FIG. 10A

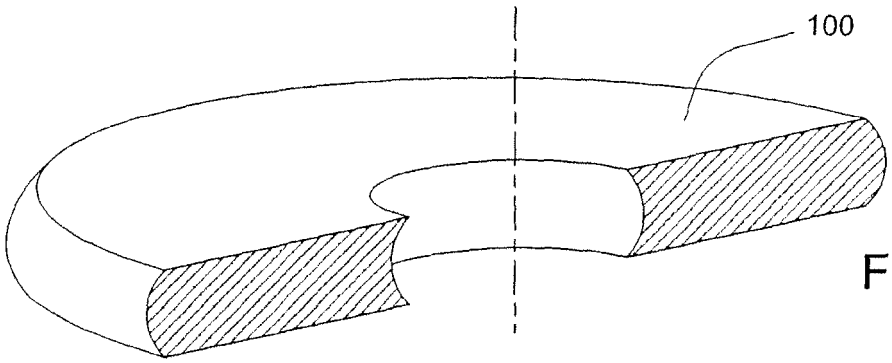

FIG. 10B

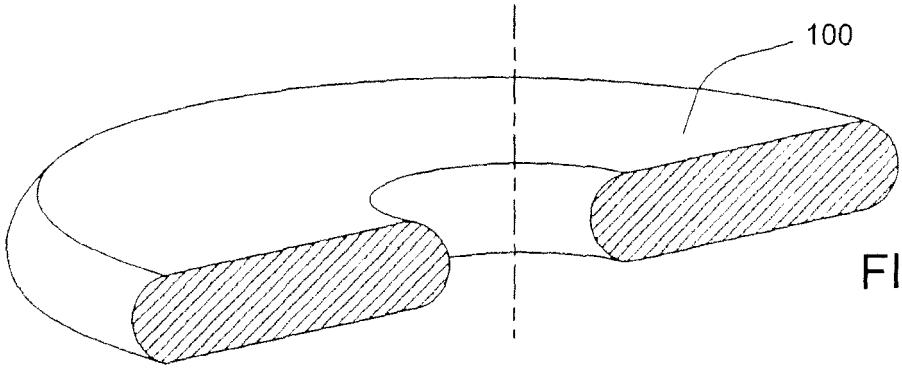

FIG. 10C

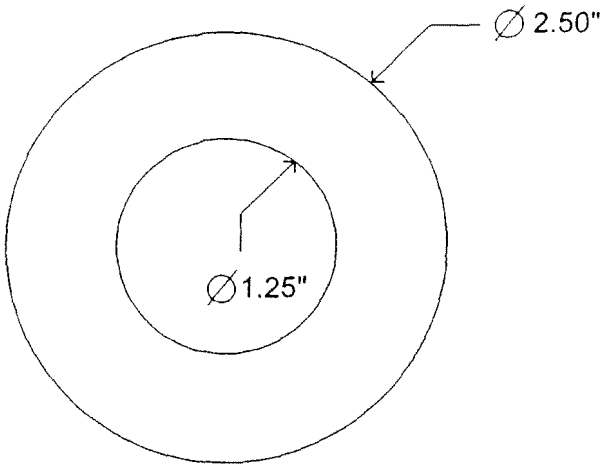

FIG. 11A

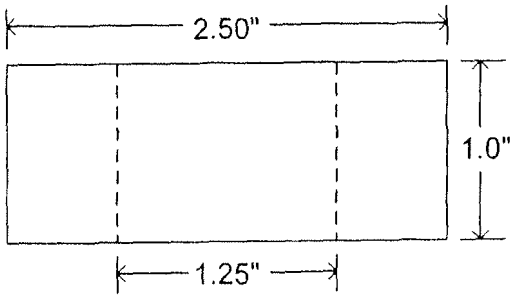

FIG. 11B

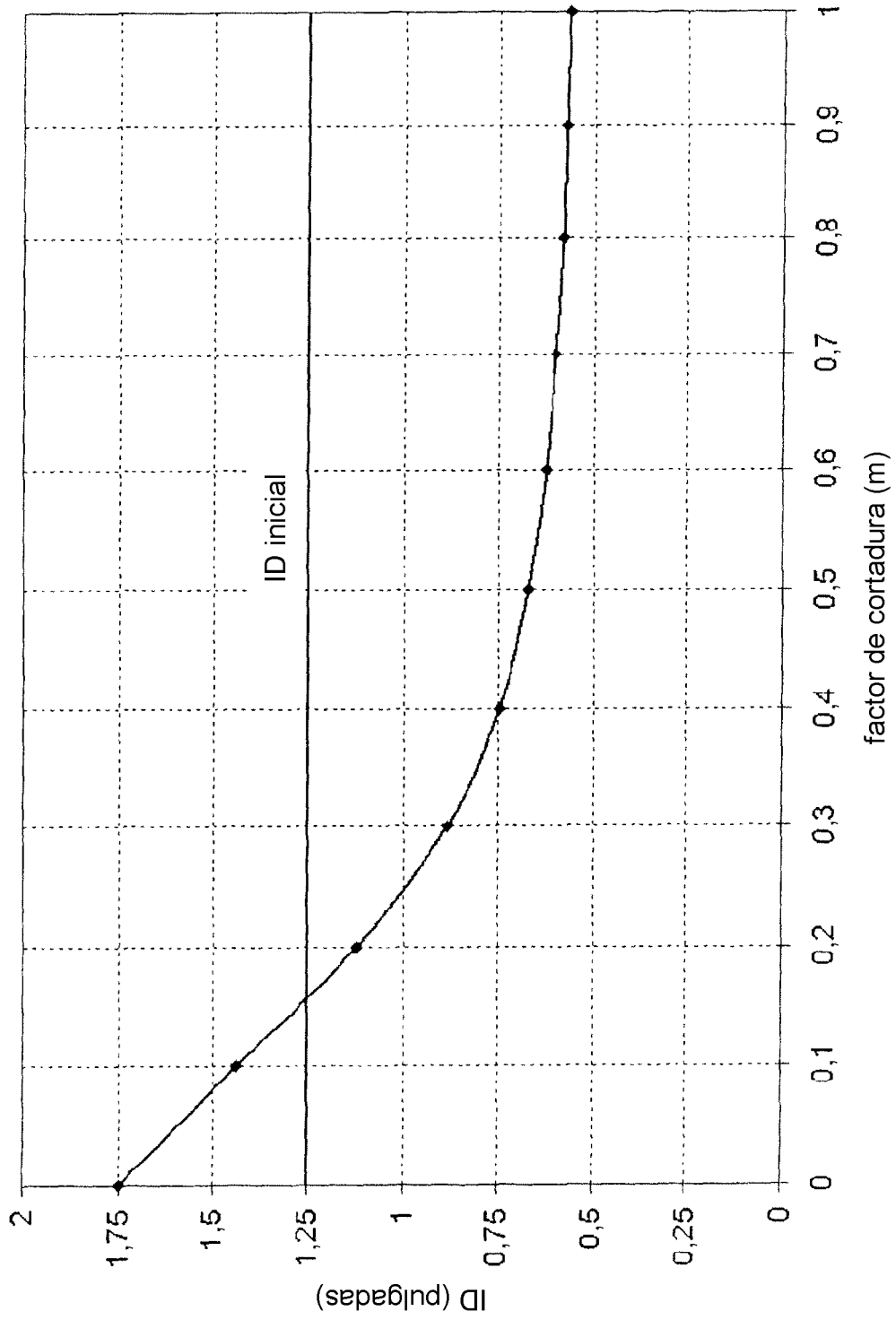
ID inicial
ID (pulgadas)
2
1,75
1,5
1,25
1
0,75
0,5
0,25
0
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1
factor de cortadura (m)

FIG. 12