

PROCEDIMIENTO E INSTALACIÓN OPTIMIZADOS DE FABRICACIÓN DE VIDRIO

PLANO POR FLOTADO

La presente invención tiene por objeto un procedimiento de fabricación de vidrio plano por flotado de una cinta de vidrio sobre un baño de metal fundido.

La fabricación de vidrio plano por flotado de una cinta de vidrio sobre un baño de metal fundido - por lo general estaño- es conocida desde hace tiempo. Este procedimiento ha permitido mejorar significativamente la planicidad del vidrio obtenido. Deja sin embargo subsistir defectos de planicidad a menor escala, por ejemplo defectos de longitud de onda entre 1 mm y 100 mm - por lo general de más de 1cm, incluso de más de 5cm - en particular en forma de defectos de ondulación o de defectos dióptricos de la placa de vidrio. Los defectos de ondulación de la placa de vidrio están caracterizados por perfiles de defectos de planicidad de las dos caras de la placa de vidrio paralelas, y no provocan por ende variaciones de espesor a la escala de la longitud de onda de estos defectos, contrariamente a los defectos dióptricos de la placa de vidrio cuyos perfiles de defecto de planicidad son simétricos con respecto al plano medio de la placa de vidrio y ocasionan variaciones de espesor a nivel de la longitud de onda de los defectos.

Estos defectos de planicidad dificultan la satisfacción de las exigencias actuales cada vez más altas en los que se refiere a la calidad óptica de la placa de vidrio en el caso de los defectos

dióptricos, pero asimismo de los productos finales como los vidrios laminados de automóviles, penalizados por los dos tipos de defecto, y en especial por los defectos de ondulación de las dos placas de vidrio que componen el producto final. Así, en lo que respecta a los vidriados de automóviles, la tendencia consiste en limitar la velocidad de arrastre de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido a fin de procurar la calidad óptica deseada. En otros campos tales como las pantallas táctiles de cristal líquido, o aún las pantallas táctiles de los teléfonos inteligentes (comúnmente llamados smartphone), es incluso preferible recurrir a otros procedimientos de fabricación del vidrio a fin de lograr un nivel de calidad óptica aún más elevado, a pesar de una menor productividad de estos procedimientos.

Una manera de cuantificar la calidad óptica de una muestra de vidrio plano en lo que hace a sus defectos de planicidad en forma de ondulaciones es la de referirse a su resultado de planicidad, el cual es igual a la diferencia tipo de la potencia óptica en reflexión para la muestra considerada. Cuanto más alto es el resultado de planicidad, menor es la calidad óptica del vidrio.

Para los vidrios sodo cálcicos fabricados por el procedimiento de fabricación por flotado tradicional de la técnica anterior, se ha establecido una correlación estadística entre el resultado de planicidad - que refleja por ende los defectos de ondulación - y los parámetros de flotado del vidrio, a saber, la velocidad de arrastre de la lámina de vidrio a la salida del baño y el espesor del vidrio a la salida del baño. Esta correlación es

dada por la siguiente relación:

$$S = C \times V^{3/2} \times h^{-2/3} \quad (1)$$

con:

- S: resultado de planicidad
- V: velocidad de arrastre longitudinal de la cinta de vidrio a la salida del baño en m/min;
- h: espesor de la cinta de vidrio a la salida del baño expresada en metro; y
- C: un coeficiente igual a 0,98.

Esta correlación es robusta, ya que los resultados de planicidad de diferentes vidrios sodo cálcicos de diferentes espesores provenientes de diferentes baños de metales y producidos a diferentes velocidades respetan esta correlación con variaciones de menos de +/-10%.

Por otra parte, en el campo de la fabricación de vidrio flotado, se conoce por la técnica anterior la aplicación de campos magnéticos al metal fundido del baño sobre el cual la cinta de vidrio se desplaza.

Es el caso por ejemplo de EP 304 844 A2, que busca una solución que permita acortar el baño de metal fundido a fin de limitar las pérdidas de calor, mientras que el acortamiento del baño de metal tiene el inconveniente de generar fuertes corrientes de convección natural en el baño de metal, y por otra parte el hecho de ubicar una barrera en el baño de metal para separar el baño en una zona alta y una zona baja conduce también a un gradiente térmico axial muy importante y por ende a fuertes

corrientes de convección natural espiralados a nivel de la barrera que acarrearán distorsiones en el vidrio fabricado en forma de crestas y de huecos en forma de estrías, es decir, defectos dióptricos.

Con tal objeto, se indica la aplicación de un campo magnético generado por una corriente continua o un imán permanente que sean capaz de suprimir localmente el movimiento del baño de metal fundido -creando así una barrera de metal fundido fija -de manera que las transferencias de calor tengan lugar por conducción y radiación, y por ende sin cambio local de temperatura, lo que evita que los defectos dióptricos mencionados se formen en la cinta de vidrio.

Por el contrario, esta medida en EP 304844 A2 no apunta a reducir o suprimir los defectos de ondulaciones mencionados anteriormente. Además, la misma es aplicada específicamente en el caso de baños de metales acortados que por ello son sensiblemente más cortos que los baños clásicos, que tienen una longitud de al menos 50m, incluso más, estando la longitud de flotado por lo general comprendida entre 54 m y 64m. Por otra parte, EP 304844 A2 no trata tampoco la fabricación de vidrio fino, por ejemplo de un espesor inferior o igual a 1 mm, incluso inferior o igual a 0,7mm.

EP 304 844 A2 indica asimismo la aplicación, en una zona alta donde el vidrio tiene una viscosidad aún muy baja, de un campo magnético que se desliza en dirección de la zona baja del baño de metal fundido para modificar el espesor del baño de metal fundido de manera que sea superior en la parte superior con respecto a la

inferior, y de tal manera controlar el espesor de la cinta de vidrio fabricada. EP 251325 A2 divulga también tal indicación. EP 304 844 A2 indica asimismo la aplicación, en el extremo inferior del baño de metal fundido, de un campo magnético que se desliza en dirección de la zona superior del baño, para solicitar el metal fundido hacia hacia lo alto y de esta manera impedir que el metal fundido desborde a la salida del baño que está más bajo que la superficie del baño. Estas indicaciones relativas a la utilización de campos magnéticos deslizables no apuntan por ende a mejorar la calidad óptica del vidrio.

US 2010/206009 A1 describe también la utilización de un motor lineal a la salida del baño para solicitar y desplazar el metal fundido hacia la zona superior por aplicación al metal fundido de un campo magnético que se desplaza. FR 2732122 A1 menciona la utilización de motores de inducción lineal para establecer por vía electromagnética corrientes de metal.

De hecho, ninguno de los documentos mencionados trata, incluso ni menciona el problema de las ondulaciones del vidrio que degradan su calidad óptica.

El objetivo de la presente invención es el de optimizar el procedimiento de fabricación de vidrio plano por flotado sobre un baño de metal fundido, en particular, pero no solamente en el caso del vidrio sodo cálcico. Más específicamente, comparado a la técnica caracterizada por la correlación (1) definida más arriba, un objetivo la invención es el de permitir la fabricación por flotado de un vidrio plano que presenta una misma calidad óptica,

en particular en lo que se refiere a defectos de ondulación, es decir, que posea un mismo resultado de planicidad, pero permitiendo recurrir a una velocidad de arrastre superior de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido. O incluso, formulado de otro modo, un objetivo de la invención es el de permitir la fabricación por flotado de vidrio plano que presenta una mejor calidad óptica, en particular en lo que respecta a defectos de ondulación, pero siempre desplazando la cinta de vidrio a una misma velocidad sobre el baño de metal fundido. Por supuesto, la invención apunta a alcanzar este objetivo sin por ello aumentar los defectos dióptricos del vidrio obtenido.

Con tal fin, la presente invención propone, según un primer aspecto, un procedimiento de fabricación de vidrio plano por flotado de una cinta de vidrio sobre un baño de metal fundido, en el cual la cinta de vidrio es desplazado a velocidad constante siguiendo una dirección de desplazamiento longitudinal desde un lado superior del baño, donde el vidrio fundido es colado en continuo sobre el metal fundido hasta un lado inferior del baño, donde la cinta de vidrio fija sale del baño, el procedimiento comprende:

- someter a un campo magnético estático todo o parte del metal fundido situado bajo la cinta de vidrio para frenar el desplazamiento de dicho metal fundido o sensiblemente fijarlo, y esto para al menos una parte de la longitud de una zona del baño para la cual el vidrio satisface a la relación siguiente:

$$10^{-3,5} \text{ Pa.m}^3.\text{s} < \mu.h^3 < 10^{-2} \text{ Pa.m}^3.\text{s} \quad (2)$$

con:

- μ : la viscosidad del vidrio expresada en Pa.s, y

-h: el espesor de la cinta de vidrio expresado en metro.

La invención está basada sobre la constatación efectuada en el marco de la invención, del hecho que existen turbulencias en el baño de metal fundido inmediatamente bajo la cinta de vidrio y que, en la zona del baño de metal mencionado, estas turbulencias se impregnan en la superficie de la cinta de vidrio creando así defectos en forma de ondulaciones de la lámina de vidrio que subsisten en la lámina de vidrio obtenida. Aún cuando por definición los defectos de ondulación no ocasionan variaciones de espesor de la lámina de vidrio, y por ende ningún defecto óptico en transmisión a través de la lámina de vidrio, estos contribuyen por un lado importante a degradar la planicidad de las dos superficies de la placa de vidrio, en particular para las aplicaciones electrónicas como el smartphone y la calidad óptica de los productos finales como los vidrios laminados de automóviles, donde los defectos de ondulación de las dos placas de vidrios van a sumarse para degradar la calidad óptica en transmisión del producto final. Sin querer estar ligado a cualquier teoría, pareciera ser que estas turbulencias que existen en el metal fundido en esta zona crítica del baño están ligadas a variaciones de presión que resultan de la convección forzada engendrada por la cinta de vidrio, así como a los esfuerzos de tironeo a los que es sometido el metal fundido bajo la cinta de vidrio a razón de la tracción ejercida sobre la cinta de vidrio

para arrastrarla sobre el baño de metal fundido. Por el contrario, fuera de esta zona crítica, estas turbulencias en el baño de metal fundido son menos perjudiciales dado que, por encima de la zona crítica, la viscosidad de la cinta de vidrio es demasiado baja (ligada a la temperatura de la cinta de vidrio más elevada) para que las ondulaciones subsistan de manera sensible a la superficie del vidrio, en tanto que, por debajo de la zona crítica, la cinta de vidrio posee una viscosidad más elevada (ligada a la temperatura de la cinta de vidrio que ha disminuido) y está suficientemente fija para evitar que las turbulencias que existen en el metal fundido puedan impregnarse en la superficie del vidrio.

En la práctica, la posición de la zona crítica es dependiente de varios parámetros, en particular de la composición del vidrio, de las condiciones de formado del vidrio y del espesor del vidrio fabricado. Es posible delimitar esta zona crítica recurriendo a la cantidad $\mu \cdot h^3$, con μ la viscosidad del vidrio y h el espesor de la cinta. La cantidad $\mu \cdot h^3$ está directamente ligada al tiempo característico de deformación del vidrio en respuesta a una sollicitación mecánica. La misma permite cuantificar la susceptibilidad del vidrio a deformarse bajo el efecto de una carga, a saber, por ejemplo los requerimientos mecánicos del vidrio por el metal fundido en razón de las variaciones locales de presión en el baño de metal en la interfaz vidrio/metal, también comúnmente llamadas forzado en presión. En el marco de la invención, se ha determinado que la zona crítica corresponde a la

porción de longitud de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido donde el vidrio satisface a la relación(2) mencionada anteriormente.

Se ha estimado que las turbulencias existentes en el baño de metal fundido en esta zona crítica contribuyen en aproximadamente $2/3$ al valor de planicidad del vidrio final.

En consecuencia, la invención propone reducir, incluso suprimir las turbulencias en el metal fundido en la interfaz con la cinta de vidrio sometiendo fundido bajo la cinta de vidrio en esta zona crítica, o al menos para una parte de la misma, a un campo magnético estático. El campo magnético estático va inducir corrientes eléctricas en el metal fundido, las cuales son sometidas al campo magnético estático, lo cual tiene por efecto la creación de fuerzas de Lorentz que se ejercen de manera volúmica sobre el metal fundido. Estas fuerzas de Lorentz van a oponerse al desplazamiento del metal fundido que la cinta de vidrio tiende a arrastrar. El hecho de frenar el metal fundido bajo la cinta de vidrio tiene por efecto limitar las variaciones de presión en el metal fundido, y por ende limitar las ondulaciones que pueden llegar a imprimirse en la superficie de la cinta de vidrio. En el caso en que las fuerzas de Lorentz son suficientemente elevadas como para fijar el metal fundido sobre sensiblemente toda la profundidad del baño, solo la capa delgada de metal fundido continúa pasando en la interfaz con la cinta de vidrio, y esto sucede de manera laminar. Así no se imprimen más ondulaciones en la superficie de la cinta de vidrio ligadas a turbulencias o

variaciones de presión en el metal fundido en la interfaz con la cinta de vidrio, dado que las mismas son sensiblemente inexistentes en este caso.

Según los modos de realización preferidos, el procedimiento comprende una o varias de las siguientes medidas:

- elegir dicho campo magnético sensiblemente perpendicular a la superficie de la cinta de vidrio, lo que es particularmente eficaz para crear un freno magnético que actúa sobre el metal fundido, pero alternativamente el campo magnético puede estar orientado diferentemente, por ejemplo en dirección lateral con respecto al baño de metal fundido o en la dirección de la longitud del baño de metal fundido,
- someter el metal fundido a dicho campo magnético sobre todo el ancho de la cinta del vidrio,
- someter el metal fundido a dicho campo magnético sobre todo el ancho de la cinta del vidrio sin someter el metal fundido en una región contigua al borde lateral del baño de cada lado de la cinta de vidrio,
- generar el campo magnético de manera que sea sensiblemente homogéneo sobre todo el ancho de la cinta del vidrio,
- generar el campo magnético de manera que sea sensiblemente homogéneo en el interior de playas longitudinales en el seno de la zona del baño de metal fundido sometida al campo magnético,
- fijar la intensidad del campo magnético a un valor suficiente para sensiblemente fijar el metal fundido del baño situado bajo la

cinta de vidrio sobre sensiblemente toda la profundidad del baño para al menos una parte de la longitud de esta zona del baño de manera de hacer allí laminar el colado de metal fundido en la interfaz con la cinta de vidrio,

- el vidrio es un vidrio sodo cálcico, y seleccionar la intensidad del campo magnético y según el caso la ubicación longitudinal y la longitud de la porción en el seno de dicha zona del baño sometida al campo magnético para que el valor de planicidad en función de la velocidad de arrastre longitudinal de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido sea regido por la fórmula:

$$S \leq C \times v^{3/2} \times h^{-2/3}$$

con:

- S: valor de planicidad
- V: velocidad de desplazamiento longitudinal de la cinta de vidrio en m/min;
- h: espesor de la cinta de vidrio expresado en metro;y
- C: un coeficiente igual a 0,85, más preferentemente igual a 0,8, incluso igual a 0,75, o más convenientemente igual a 0,7, incluso igual a 0,65, o aún más convenientemente igual a 0,55, incluso 0,45 o incluso 0,35,
- someter el metal fundido a dicho campo magnético sobre al menos 15%, más preferentemente sobre al menos 25%, aún más preferentemente sobre al menos 33%, más preferentemente aún sobre al menos 50%, más preferentemente aún sobre al menos 75% y más convenientemente aún sobre 100% de la longitud de dicha zona del baño medida en la dirección de desplazamiento longitudinal de la

cinta de vidrio,

- someter el metal fundido a dicho campo magnético solamente para una parte de la longitud de dicha zona del baño medida en la dirección de desplazamiento longitudinal de la cinta de vidrio, extendiéndose dicha parte a partir de la extremidad de dicha zona donde la temperatura del vidrio es la más elevada,
- someter al campo magnético estático al menos una parte de dicha zona para la cual la viscosidad es superior a $3,17 \times 10^5$ Pa.s y preferentemente superior o igual a $3,50 \times 10^5$ Pa.s, incluso más preferentemente aún superior o igual a $3,80 \times 10^5$ Pa.s, incluso más convenientemente superior o igual a 5×10^5 Pa.s, incluso más convenientemente aún superior o igual a 10^6 Pa.s,
- someter a dicho campo magnético(B) al menos 15%, más preferentemente 15 al menos 25%, aún más preferentemente al menos 33 %, más preferentemente aún al menos 50%, más preferentemente aún al menos 75% y más convenientemente aún 100% de la longitud de dicha parte de dicha zona (Z) medida en la dirección de desplazamiento longitudinal de la cinta de vidrio,
- acelerar el enfriado de la cinta de vidrio en la zona de aplicación del campo magnético,
- seleccionar una longitud total de flotado del vidrio sobre el baño de metal fundido que sea superior o igual a 50 m, preferentemente entre 54 m y 64 m.

Según un segundo aspecto, la invención propone utilizar un campo magnético estático para hacer laminar el colado de metal fundido en la interfaz de una cinta de vidrio fabricada por

flotado a velocidad constante sobre un baño de metal fundido, y esto para al menos una parte de la longitud de una zona del baño para la cual el vidrio satisface a la relación siguiente:

$$10^{-3,5} \text{ Pa.m}^3.\text{s} < \mu.h^3 < 10^{-2} \text{ Pa.m}^3.\text{s}$$

con:

- μ : la viscosidad del vidrio expresado en Pa.s, y
- h: el espesor de la cinta de vidrio expresado en metro.

Según un tercer aspecto, la invención propone utilizar un campo magnético estático para reducir los defectos de ondulación en una cinta de vidrio fabricada por flotado a velocidad constante sobre un baño de metal fundido.

Según un modo de realización preferido, el campo magnético estático es aplicado sensiblemente perpendicularmente a la superficie de la cinta de vidrio a todo o parte del metal fundido situado bajo la cinta de vidrio para frenar el desplazamiento de dicho metal fundido o sensiblemente fijarlo, y esto para al menos una parte de la longitud de una zona del baño para la cual el vidrio satisface a la relación siguiente:

$$10^{-3,5} \text{ Pa.m}^3.\text{s} < \mu.h^3 < 10^{-2} \text{ Pa.m}^3.\text{s}$$

con:

- μ : la viscosidad del vidrio expresado en Pa.s, y
- h: el espesor de la cinta de vidrio expresado en metro.

En este segundo y tercer aspecto, se pueden utilizar convenientemente estas medidas para fijar la velocidad de arrastre longitudinal de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido

en consideración del valor de planicidad a obtener para el vidrio fabricado, según la siguiente fórmula:

$$S \leq C \times v^{3/2} \times h^{-2/3}$$

con:

- S: valor de planicidad a obtener;
- V: velocidad de desplazamiento longitudinal de la cinta de vidrio en m/min;
- h: espesor de la cinta de vidrio expresado en metro;y
- C: un coeficiente igual a 0,85, más preferentemente igual a 0,8, incluso a 0,75, o más convenientemente igual a 0,7, incluso a 0,65, o aún más convenientemente igual a 0,55, incluso 0,45 o mismo 0,35.

Según un cuarto aspecto, la invención propone asimismo una instalación concebida para implementar el procedimiento según cualquiera de los tres aspectos anteriores, y que comprende:

- una cubeta prevista para recibir un baño de metal fundido y dimensionada para permitir la fabricación de vidrio plano por flotado de una cinta de vidrio siguiendo una dirección de desplazamiento longitudinal desde un lado superior del baño, donde el vidrio fundido es colado en continuo sobre el metal fundido hasta un lado inferior del baño, donde la cinta de vidrio fijada abandona el baño, teniendo la cubeta una longitud de al menos 50 metros y más preferentemente de al menos 54 metros; y
- un dispositivo para generar un campo magnético estático sensiblemente vertical y ubicado por encima y/o por debajo de la cubeta, de manera de someter el interior de la cubeta a dicho

campo magnético estático para una parte longitudinal de la cubeta.

Según los modos de realización preferidos, el procedimiento comprende una o varias de las características siguientes:

- el dispositivo comprende electro imanes y/o imanes permanentes,
- el dispositivo está previsto para generar un campo magnético solamente para una porción de ancho de la cubeta, dejando libre de campo magnético una región contigua a cada uno de los bordes laterales del baño,
- el dispositivo está previsto para que el campo magnético generado sea sensiblemente homogéneo sobre todo el ancho de aplicación del campo magnético en el interior de la cubeta,
- el dispositivo está previsto para que el campo magnético generado sea sensiblemente homogéneo en el interior de playas longitudinales en el seno de la parte longitudinal de la cubeta sometida al campo magnético,
- el dispositivo está dispuesto para ser desplazable con respecto a la cubeta siguiendo la dirección longitudinal de la cubeta,
- la instalación comprende además:
 - rodillos extractores para arrastrar a una velocidad continua la cinta de vidrio sobre el baño de metal contenido en la cubeta, estando dichos rodillos extractores situados en el exterior de la cubeta en una extremidad longitudinal de la misma, y/o
 - rodillos de bordes dentados para aplicar a la cinta de vidrio sobre el baño de metal esfuerzos transversales a la dirección de desplazamiento longitudinal, estando dichos rodillos de bordes dentados posicionados de los dos lados laterales de la cubeta.

De manera general, la invención está particularmente adaptada a la fabricación de vidrio plano de espesor inferior o igual a 3 mm, ya que para este las turbulencias en la superficie del metal fundido tienen mayor tendencia a imprimir definitivamente ondulaciones en la superficie del vidrio. La misma es aún más adaptada a la fabricación de vidrio plano más fino, puesto que, cuanto más fino es el vidrio a fabricar, más importante se torna el problema de los defectos de ondulación. Así, la invención es particularmente conveniente para la fabricación de vidrio plano que posee un espesor inferior o igual a 2,1 mm, o más aún si su espesor es inferior o igual a 1,4 mm. La misma es aún más conveniente en el caso de un espesor inferior a 1 mm, y aún más en el caso de un espesor inferior o igual a 0,7 mm. Pero es preferible que el vidrio plano fabricado posea un espesor de al menos 0,5 mm. Por otra parte, la invención está en particular adaptada a la fabricación industrial de vidrio plano con una velocidad de desplazamiento longitudinal de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido qui es superior o igual a 10 m/min. Pero es preferible que la velocidad sea inferior o igual a 30 m/min. Con más frecuencia, puede ser implementada en el marco de fabricación particular donde se utiliza una velocidad de desplazamiento longitudinal de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido más baja.

Otros aspectos, características y ventajas de la invención aparecerán en la lectura de la descripción que sigue, de un modo de realización preferido de la invención, brindada a título de

ejemplo y en referencia al dibujo en anexo.

La figura 1 es una representación esquemática de una instalación de fabricación de vidrio plano por flotado que está prevista para implementar un procedimiento según un modo de realización preferido de la invención.

La figura 2 es una representación esquemática de una vista en corte siguiendo las flechas A-A a través de la instalación representada en la figura 1.

Las figuras 3 y 4 son una ampliación de la zona D identificada sobre la figura 2, a saber una media vista superior y una vista en corte vertical respectivamente.

La figura 5 ilustra una porción de longitud de la cinta de vidrio obtenido por flotado y la manera de identificar allí perfiles uni dimensionales a fin de determinar el valor de planicidad del vidrio fabricado.

La figura 6 ilustra curvas obtenidas en la implementación de un procedimiento de determinación del valor de planicidad para un ejemplo de vidrio.

Como se puede ver en la figura 1, la instalación comprende una cubeta 1 provista de paredes laterales 2 y de paredes de extremidades 3 y 4 respectivamente en la entrada y en la salida de la cubeta 1. La cubeta 1 contiene un baño de estaño en fusión, o de cualquier otro metal en fusión apropiado, con referencia 7. El vidrio fundido es vertido sobre el baño de metal en fusión 7 en su entrada, a partir de un canal de distribución 6 que termina en un labio de colada y dispuesto por encima de la pared de entrada 3 de

la cubeta 1. La cinta de vidrio 8 que se forma sobre el baño de metal en fusión 7 es arrastrada en continuo a velocidad constante siguiendo una dirección de desplazamiento longitudinal L desde la entrada de la cubeta - es decir el lado superior del baño - hasta su salida - es decir el lado inferior del baño - por rodillos extractores 9 situados en el exterior de la cubeta 1 del lado inferior.

Desde el punto de vista del vidrio, el baño define varias zonas sucesivas siguiendo la dirección de desplazamiento longitudinal L de la cinta de vidrio 8. Luego de haber sido vertido sobre el baño de metal fundido 7, el vidrio se reparte libremente al máximo sobre el baño en una primera zona I. Se forma de este modo una cinta de vidrio 8 que se desplaza hacia abajo bajo el efecto de la tracción de los rodillos extractores 9.

Luego en una segunda zona II, la cinta de vidrio en formación es sometida a fuerzas longitudinales y dirigidas transversalmente hacia el exterior bajo las acciones combinadas de rodillos extractores 9 y de rodillos de bordes dentados 9'. Los rodillos de bordes dentados 9' son por lo general de acero y ligeramente oblicuos con respecto a la dirección de desplazamiento longitudinal L de la cinta de vidrio 8. Estos son movidos por motores - no representados - por lo general a velocidades diferentes según su posición, y crecientes hacia la parte inferior. En esta segunda zona II, el estirado del vidrio comienza y este se afina. En una tercera zona III, la cinta de vidrio toma su forma definitiva bajo la acción de los rodillos extractores 9

que la conducen en dirección de la salida del baño.

Las segunda y tercer zonas II, III forman juntas la zona de estirado que es seguida por una cuarta zona IV, llamada de consolidación, en la cual la cinta de vidrio fija se enfría progresivamente.

La instalación comprende un dispositivo 10 que produce un campo magnético 10 estático B al cual es sometido el metal fundido en la zona crítica Z del baño de metal fundido 7 definida por la relación (2) mencionada anteriormente. La zona crítica Z posee habitualmente una longitud de 4 a 6 metros en ausencia de enfriado forzado de la cinta de vidrio 8 en esta zona. El dispositivo 10 puede ser implementado con electro imanes y/o con imanes permanentes.

Las figuras 3 y 4 ilustran un ejemplo de dispositivo 10 que implementa electro imanes. En este caso, el dispositivo 10 está dispuesto por encima de la cubeta 1, pero podría igualmente estarlo por debajo de la cubeta 1.

El campo magnético B es preferentemente sensiblemente vertical a través del baño de metal fundido. En régimen normal de producción, el campo B es preferentemente aplicado en forma continua en la zona crítica Z del baño mientras que la cinta de vidrio 8 es arrastrada en continuo con una velocidad de desplazamiento longitudinal constante sobre el baño de metal fundido 7.

En una implementación particularmente conveniente, la intensidad del campo B es seleccionada suficientemente elevada

para fijar - gracias a las fuerzas de Lorentz - el metal fundido sobre sensiblemente toda la profundidad del baño de metal fundido 7 de manera de dejar subsistir solamente una capa delgada de metal fundido 7 que se reparte de manera laminar en la interfaz con la cinta de vidrio 8. De este modo, las turbulencias en el metal fundido 7 en la interfaz con la cinta de vidrio 8 son sensiblemente suprimidas, y se evita entonces la impresión de ondulaciones en la superficie de la cinta de vidrio 8 que provocarían estas turbulencias del metal fundido si las mismas no fueran suprimidas. A título de ejemplo, este efecto es obtenido con un campo B de aproximadamente 0,1 Tesla para un baño de estaño 7 que posee una profundidad de 64 mm en la zona crítica Z y una velocidad media de desplazamiento longitudinal de la cinta de vidrio en esta zona de aproximadamente 14 m.m⁻¹. Este valor del campo B puede ser extrapolado a otras profundidades de estaño y otras velocidades de vidrio, así como para otros metales, utilizando el siguiente parámetro de interacción:

$$N = \frac{\sigma B^2 h}{\rho V}$$

con:

- B: el módulo del campo magnético;
- σ : la conductividad del metal fundido;
- ρ : la densidad del metal fundido;
- V: la velocidad de arrastre de la cinta de vidrio 8 en la dirección de desplazamiento longitudinal L;
- h: la profundidad del baño de metal fundido en la zona de

aplicación del campo B.

El parámetro de interacción N permite trasladar los efectos de las fuerzas de Lorentz sobre el metal fundido 7 a los de la inercia del metal fundido 7. Si idealmente el parámetro de interacción N puede ser seleccionado igual a 10 para un campo magnético estático, las simulaciones numéricas han mostrado que es posible fijarlo de manera satisfactoria en un valor inferior. Sin embargo, es preferible que el mismo sea seleccionado superior o igual a 0,5, más preferentemente superior o igual a 1, aún más preferentemente superior o igual a 2, y más preferentemente superior a 5.

En el ejemplo ilustrado esquemáticamente en las figuras 3 y 4, el dispositivo 10 comprende una pluralidad de electro imanes dispuestos lado a lado en la dirección de desplazamiento longitudinal L, comprendiendo cada uno una bobina 11 de hilo de cobre o similar. Como lo ilustra la figura 4, la alimentación eléctrica de las bobinas 11 es realizada de manera de alternar los polos magnéticos en la dirección longitudinal del baño de metal fundido 8, lo que permite manejar el cierre de la líneas de campo magnético cada vez entre dos bobinas 11 consecutivas. En cada bobina 11 está ubicado un núcleo respectivo 12 de alta permeabilidad magnética -realizado por ende preferentemente en un material ferromagnético - para canalizar las líneas de campo magnético y homogeneizar el campo magnético bajo los núcleos 12 de las bobinas 11.

Es preferible que el dispositivo 10 sea enfriado, por ejemplo con agua, y que sea aislado térmicamente a fin de prevenir cualquier recalentamiento, incluso mantenerlo bajo la temperatura de Curie en el caso de imanes permanentes.

El metal fundido del baño 7 es preferentemente sometido al campo B sobre todo el ancho de la cinta de vidrio 8 a fin de que allí sea sometido a las fuerzas volúmicas de Lorentz bajo todo el ancho de la cinta de vidrio 8. A tal fin, las bobinas 11 son seleccionadas con un ancho suficiente (medido perpendicularmente a la dirección de desplazamiento longitudinal L), a saber en los casos usuales entre 4 m y 5 m.

Es preferible que el campo B sea sensiblemente homogéneo en la dirección lateral - es decir la dirección perpendicular a la dirección de desplazamiento longitudinal L -, dicho de otro modo que el campo B tenga la misma intensidad y la misma orientación en cualquier punto del metal fundido contenido en una misma sección del baño de metal fundido 7 perpendicular a la dirección de desplazamiento L. De este modo, las fuerzas volúmicas de Lorentz ejercidas sobre el metal fundido 7 son sensiblemente idénticas en cualquier punto de una sección transversal del baño de metal fundido 7. Por otra parte, si por razones de implementación práctica, como es el caso en el ejemplo de las figuras 3 y 4, la intensidad del campo B no es constante en la dirección de desplazamiento longitudinal L, además de la inversión del campo B ligado a la sucesión de las bobinas 11 en esta dirección, es asimismo conveniente concebir el dispositivo 10 de manera de

procurar bandas longitudinales - es decir que se extiendan siguiendo la dirección L - en el seno de la zona del baño 7 sometida al campo B en las cuales el campo B es sensiblemente homogéneo. Estas medidas favorecen la laminarización del colado de metal fundido 7 a nivel del conjunto de la interfaz con la cinta de vidrio 8.

Por otra parte, es preferible que el campo B no sea aplicado en dirección lateral sobre todo el ancho del baño de metal fundido 7, sino que se detenga a un nivel lateral que sea intermedio entre la cinta de vidrio 8 y las paredes laterales 2 de la cubeta 1. Se favorece de esta manera el bucle de las líneas de corrientes eléctricas inducidas por el campo B en el metal fundido 7 - que son perpendiculares a la dirección de desplazamiento longitudinal L bajo la cinta de vidrio 8 - de manera horizontal en la región lateral del baño de metal fundido 7 comprendida entre la cinta de vidrio 8 y las paredes 2 de la cubeta 1. De esta manera, se limita el riesgo de que las líneas de corriente buclen verticalmente con líneas de corriente en el fondo del baño de metal fundido 7 a nivel de la base 5 y por ende también el riesgo correlativo de acelerar de manera perjudicial del metal fundido 7 en el fondo del baño. Esta medida permite asimismo limitar convenientemente el tamaño del dispositivo 10 y de su circuito de enfriado, lo que permite recurrir a bobinas 11 más pequeñas y disminuir la potencia consumida. En este caso, el metal fundido 7 puede continuar - en la zona crítica Z - vertiéndose en las regiones laterales del baño de metal fundido 7 que no están sometidas al campo B. Una

circulación de metal fundido 7 se mantiene entonces posible entre la parte del baño por encima de la zona crítica Z y la parte posterior de la zona crítica Z.

La aplicación del campo B al baño de metal fundido 7 para toda o parte de la longitud de la zona crítica Z procura una optimización de la calidad óptica del vidrio obtenido para una velocidad de desplazamiento longitudinal dada de la cinta de vidrio 8 o, dicho de otro modo, permite aumentar en cierta medida la velocidad de arrastre de la cinta de vidrio 8 en la dirección longitudinal L sin deteriorar la calidad óptica del vidrio obtenido. Cuanto más grande es la parte de la longitud de la zona crítica Z para la cual el metal fundido 7 es sometido al campo B, mayor es la ganancia en términos de calidad óptica del vidrio y/o de aumento de la velocidad de arrastre de la cinta de vidrio. Si el metal fundido es sometido solamente en una parte de la longitud de la zona crítica Z, es preferible que la misma esté ubicada del lado superior de la zona Z, es decir allí donde la temperatura del vidrio es la más elevada, ya que es donde se imprimen más ondulaciones en la superficie de la cinta de vidrio 8. Sin embargo, se comprenderá que el hecho de aplicar el campo B a la parte inferior de la zona crítica Z contribuye también a la ganancia en términos de calidad óptica del vidrio y/o de aumento de la velocidad de arrastre de la cinta de vidrio 8. Por el contrario, no es útil aplicar el campo B al metal fundido 7 por debajo de la zona crítica Z dado que los defectos de ondulación engendrados por encima de la zona crítica Z no se imprimen en la

cinta de vidrio 8.

Los cálculos han permitido establecer que, con el fin de obtener una misma calidad óptica de un vidrio sodo cálcico que posea un espesor de 2,1 mm, el hecho de fijar sensiblemente el metal fundido bajo la cinta de vidrio 8 por medio del campo B sobre toda la longitud de la zona crítica Z - correspondiente en este caso a un intervalo de temperatura de 150°C del vidrio -, la velocidad de arrastre V de la cinta de vidrio 8 en la dirección longitudinal L puede potencialmente ser aumentada en 63% con respecto al caso en el que el metal fundido del baño 7 no es sometido a un campo magnético. Si se fija así el metal fundido del baño 7 solamente para la porción de longitud de la cinta de vidrio 8 correspondiente al intervalo de los 100°C más críticos de la temperatura del vidrio, la velocidad de arrastre V de la cinta de vidrio 8 en la dirección longitudinal L puede potencialmente ser aumentada en 55% con respecto al caso en que el metal fundido del baño 7 no es sometido a un campo magnético. Asimismo, si se procede de igual modo para el intervalo de los 50°C más críticos de la temperatura del vidrio, la velocidad de arrastre V de la cinta de vidrio 8 en la dirección longitudinal L puede potencialmente ser aumentada en 35% con respecto al caso en que el metal fundido del baño 7 no está sometido a un campo magnético.

Se puede prever la aplicación de un enfriado forzado de la cinta de vidrio 8 en la zona de aplicación del campo B de manera de acortar la zona crítica Z. Esto permitirá convenientemente reducir la longitud del dispositivo 10. Esto puede ser realizado

por medio de enfriadores de agua 14 interpuestos entre el dispositivo electro magnético 10 y la cinta de vidrio 8 y/o de conductos de enfriado 15 dispuestos en el baño de metal fundido 7.

El dispositivo 10 puede ser convenientemente aplicado a una cubeta 1 de tipo estándar de la técnica anterior, que estaba desprovisto de un dispositivo tal. Para estas cubetas de la técnica anterior, la longitud total de flotado del vidrio 8 sobre el baño de metal fundido 7 - con referencia L_R sobre la figura 2 - está por lo general comprendida entre 54 m y 64 m. Como se puede percibir en la figura 2, esta longitud L_R es medida entre el lugar del baño de metal fundido 7 del lado superior donde el vidrio fundido es colado sobre él, y el lugar del lado inferior donde la cinta de vidrio fija 8 pierde el contacto con el baño de metal fundido 7. Más frecuentemente, es preferible mantener la longitud de flotado L_R a al menos 50 m a pesar del añadido del dispositivo 10, esto a fin de evitar engendrar corrientes de convección en el baño de metal fundido 7 por encima y por debajo de la zona de aplicación del campo B que sean perjudiciales a la calidad óptica del vidrio producido. Esto es aún más preferible si el metal fundido del baño 7 tiene la posibilidad de desplazarse entre el lado superior 10 y el lado inferior de la zona del baño 7 sometida al campo magnético B en razón de las regiones laterales a esta zona donde el metal fundido no está fijado por el campo magnético B.

Puede asimismo preverse completar el dispositivo 10 disponiendo imanes permanentes y/o electro imanes bajo la cubeta 1

en complemento a los ubicados por encima del baño de metal fundido 7 de manera tal que las líneas de campos magnéticos no se cierran en el baño de metal fundido 7.

Sea cual sea la implementación elegida desde el punto de vista del dimensionamiento y de la disposición del dispositivo 10 con respecto a la cubeta 1, el técnico tomará siempre en cuenta llegado el caso la interacción del campo magnético B y de las líneas de corrientes inducidas en el metal fundido 7 con el material constitutivo de la cubeta 1 si este no fuera neutro.

Por otra parte, es conveniente que el dispositivo 10 permita regular la intensidad del campo B según las necesidades, por ejemplo por medio de un variador de tensión. Asimismo es conveniente que el dispositivo 10 sea desplazable con respecto a la cubeta 1 siguiendo la dirección de desplazamiento longitudinal L, o dicho de otro modo siguiendo la dirección longitudinal de la cubeta 1. Por ejemplo, el dispositivo 10 puede ser sostenido por un pórtico desplazable sobre rieles. Esta medida permite ubicar el dispositivo 10 en el lugar deseado del baño 7 según la naturaleza y el espesor del vidrio plano fabricado.

El hecho de completar la instalación de fabricación de vidrio plano por flotado de una cinta de vidrio sobre un baño de metal fundido con un dispositivo que somete el metal fundido del baño a un campo magnético estático B para toda o parte de la zona crítica Z como se ha descrito más arriba, permite aumentar la velocidad de arrastre de la cinta de vidrio sobre el baño de metal fundido para una calidad óptica deseada. Tratándose del vidrio sodo cálcico, el

coeficiente C de la fórmula (1) mencionada en introducción puede ser modificado sensiblemente de manera favorable. Así, es posible obtener que el coeficiente C sea inferior o igual a 0,85 eligiendo suficientemente grandes la intensidad del campo magnético B y la porción de longitud de la zona crítica Z para la cual el metal fundido bajo la cinta de vidrio 8 es sometido al campo B, teniendo también en cuenta el posicionamiento de esta porción de longitud en el seno de la zona crítica Z. Con una selección apropiada, es posible disminuir el coeficiente C aún más, para que sea inferior o igual a 0,8, incluso a 0,75, o más convenientemente aún a 0,7, incluso a 0,65.

El valor de planicidad S puede ser controlado por medidas directas de planicidad sobre el vidrio obtenido por medio de un perfilómetro mecánico u óptico. Los perfilómetros mecánicos u ópticos permiten extraer perfiles uni dimensionales de planicidad con una precisión de muestreo (inferior a 1 mm) y de amplitud (inferior a 0,1 micron) suficiente.

Como recordatorio, la potencia óptica en reflexión $P_{Or}(x)$ sobre un perfil uni dimensional es calculada derivando dos veces la curva del perfil uni dimensional $p(x)$ (obtenida por alisado previo sobre un paso sensiblemente inferior a la longitud de onda de los defectos ópticos a evaluar, dicho de otro modo sobre un paso preferentemente inferior a 1 mm en este caso):

$$P_{Or}(x) = 2 p''(x) \quad (3)$$

El valor de planicidad S es deducido de aquí calculando la

diferencia tipo de la potencia óptica en reflexión:

$$S = \sqrt{\langle P O^2_r(x) \rangle} \quad (4)$$

con $\langle P O^2_r(x) \rangle$ que designa la media de los cuadrados de la potencia óptica en reflexión (recordando que la media aritmética de la potencia óptica en reflexión es nula en este caso).

En práctica, un procedimiento adecuado para determinar el valor de planicidad S del vidrio plano fabricado con una precisión satisfactoria es la siguiente:

- fase de extracción de perfiles uni dimensionales sobre el vidrio obtenido por medio de un perfilómetro mecánico u óptico, ilustrado por la figura 5 que representa la cinta de vidrio 8 fijada luego de la extracción de la cubeta 1, la referencia 8a designa sus bordes laterales:

- o extraer el perfil uni dimensional con el perfilómetro para al menos 20 perfiles uni dimensionales P_n diferentes del vidrio plano obtenido - comparar P_1, P_2, P_3, P_4 , etc. -, y esto para cada una de las caras principales del vidrio (en otras palabras, la que en la fabricación estaba en contacto con el baño de metal fundido 7 y la otra opuesta que estaba en contacto con la atmósfera);

- o cada uno de los perfiles uni dimensionales P_n está definido siguiendo la dirección perpendicular a la dirección de desplazamiento longitudinal L de la cinta de vidrio 8, ya que los perfiles uni dimensionales que siguen esta dirección bastan para dar cuenta de las ondulaciones de la superficie del vidrio que degradan su calidad óptica, aclarando que ha sido establecido que la dirección de ondulación es perpendicular al desplazamiento

longitudinal L de la cinta de vidrio;

o cada uno de los perfiles unidimensionales P_n es seleccionado con una longitud l_p de 80 cm, lo cual permite obtener una muestra suficientemente significativa para determinar la calidad óptica del vidrio;

o cada uno de los perfiles unidimensionales P_n es seleccionado a una distancia de un metro del anterior en la dirección de circulación longitudinal L de la cinta de vidrio 8 sobre el baño de metal fundido 7;

o cada uno de los perfiles unidimensionales P_n es seleccionado centralmente a la cinta de vidrio (considerado en la dirección perpendicular a la dirección de circulación L de la cinta de vidrio 8 sobre el baño de metal fundido 7), lo cual evita tomar en cuenta eventuales distorsiones que pueden existir hacia los bordes a razón de los rodillos de bordes 9': comparar los punteados M simbolizando las marcas dejadas por los rodillos de bordes 9';

- fase de determinación del valor de planicidad S , ilustrada por las figuras 6(a) a (d):

o para cada curva de perfil unidimensional P_n extraída, una de las cuales es presentada como ejemplo ilustrada bajo la referencia c_1 :

- determinación de la pendiente principal con referencia p , de la curva c_1 por regresión lineal;

- sustracción de la pendiente principal p de la curva c_1 , lo que permite enderezarla: comparar la curva resultante c_2 ;

- luego filtrado de la curva así enderezada c2 por un filtro de gauss robusto de ventana 50 mm - tal como el descrito en la norma ISO 16610-21 - para separar la rugosidad de la ondulación, con referencia 0, y solamente conservar la rugosidad de la curva c2 por sustracción de la ondulación 0, lo que provee una curva c3, aclarando que ha sido establecido que en práctica, son las ondulaciones de longitud de onda inferior o igual a 50 mm las que son críticas para la calidad óptica del vidrio;

- luego primera derivación de la curva de rugosidad por diferencias terminadas, lo que provee una curva c4; □

- luego filtrado de la curva c4 por una media deslizante de ventana 3 mm de la cual solo se mantiene la ondulación, lo que provee por ende una curva alisada c5; □

- luego segunda derivación de la curva resultante c5 generando así la curva c6 que corresponde a $0,5 \times P0_r(x)$ del perfil considerado: comparar fórmula (3) más arriba;

-□ luego determinación del doble de la diferencia tipo de la curva c6 para evaluar el valor de la planicidad sobre la base del perfil uni dimensional afectado: comparar fórmula (4) más arriba;

- Cálculo del valor de planicidad S del vidrio plano definido como siendo igual al promedio de las diferencias tipo determinadas para el conjunto de los perfiles uni dimensionales P_n . Es posible asimismo determinar el valor de planicidad indirectamente recurriendo a un procedimiento de medición de la calidad óptica del vidrio por ombroscopía descrita por ejemplo en US 5,602,648.

Por supuesto, la presente invención no está limitada a los

ejemplos y al modo de realización descritos y representados, sino que es susceptible de numerosas variantes accesibles al técnico especialista.

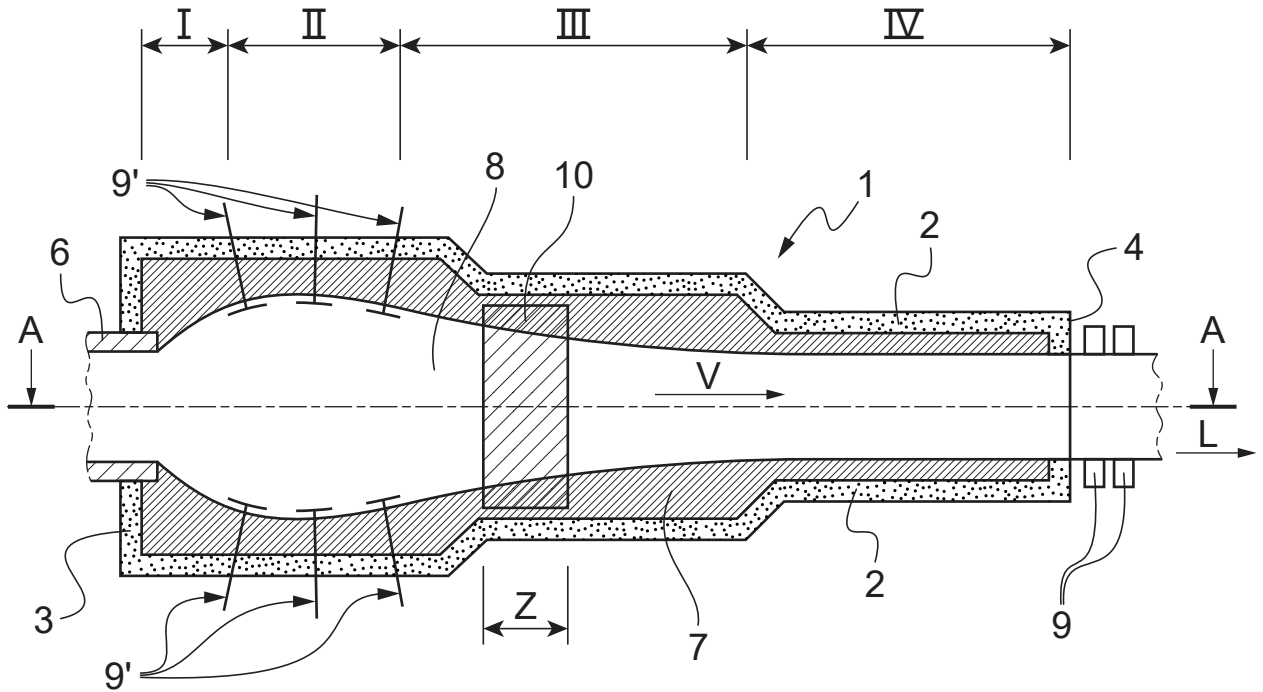


Fig.1

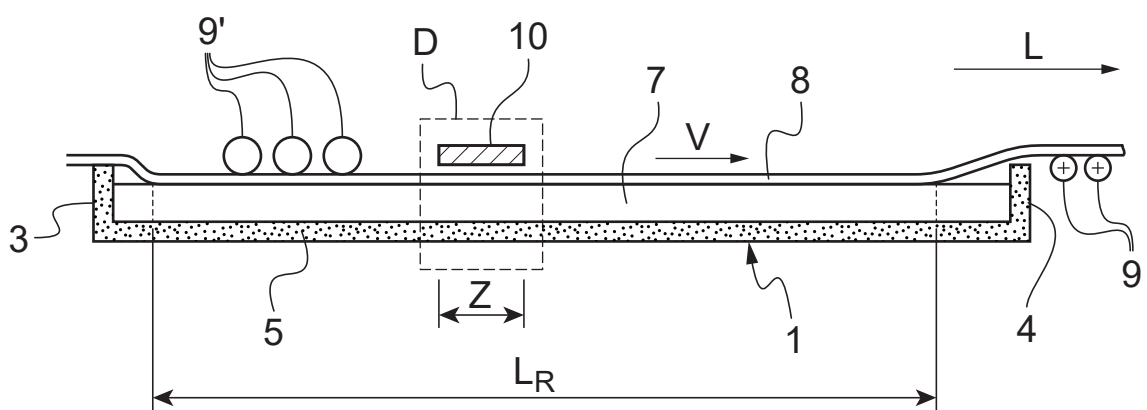


Fig.2

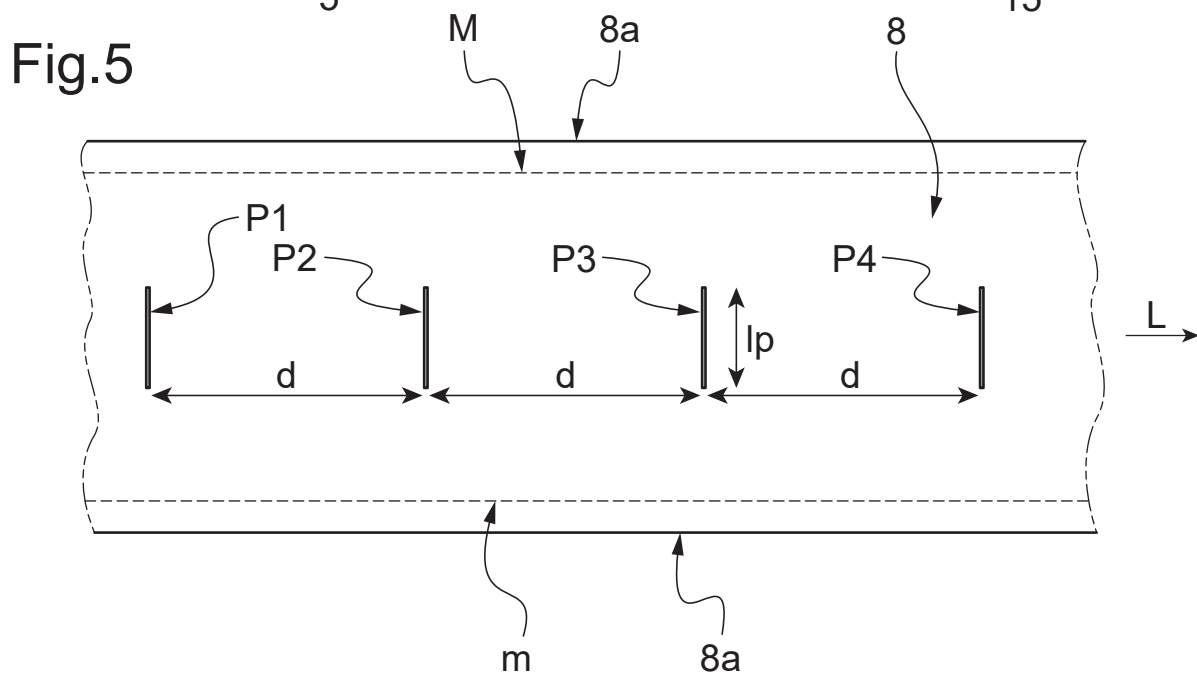
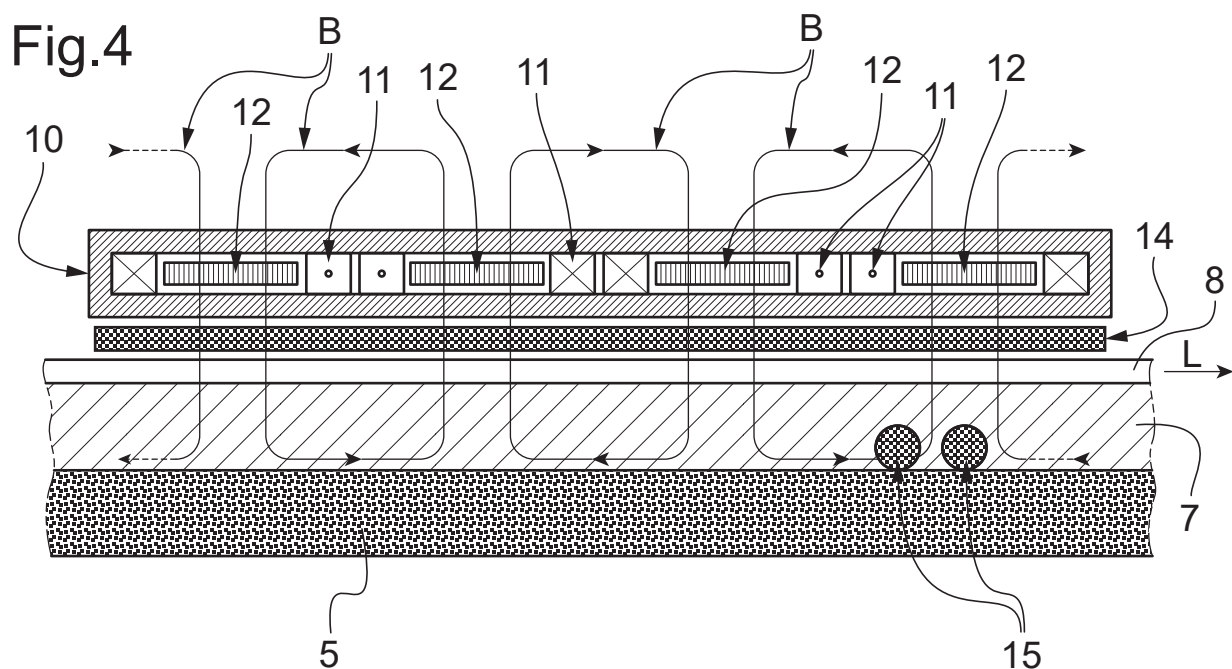
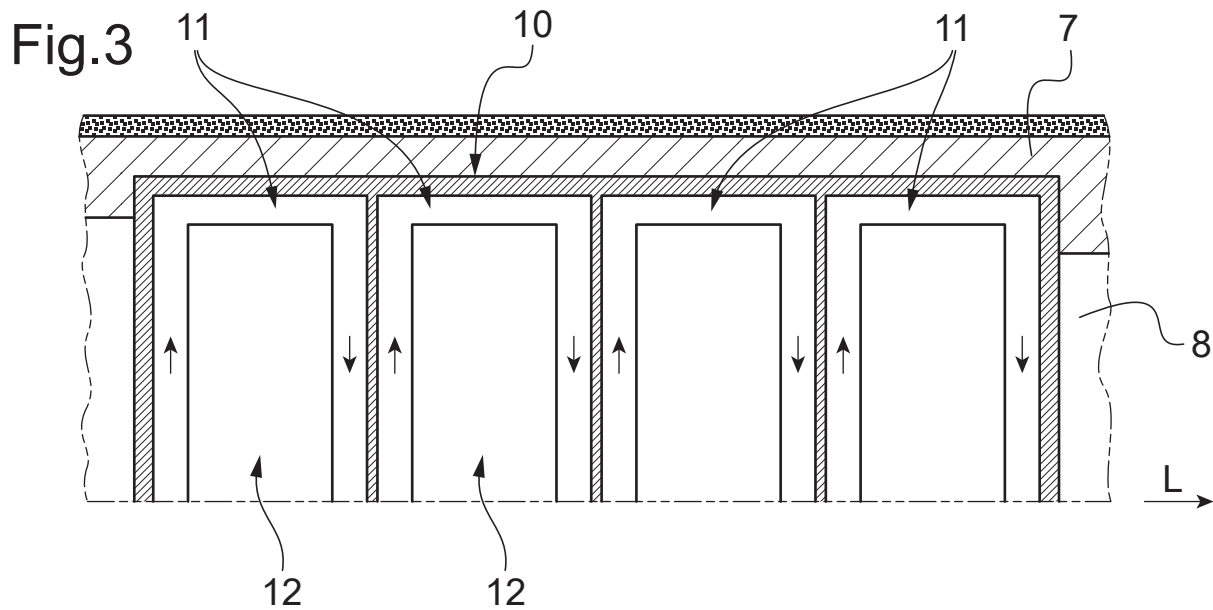


Fig.6

