



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 364 820**

51 Int. Cl.:

G21C 3/16 (2006.01)

G21C 21/02 (2006.01)

G21C 3/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08805772 .4**

96 Fecha de presentación : **13.05.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2147440**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **27.01.2010**

54

Título: **Combustible nuclear en forma de pastilla con estructura perfeccionada.**

30

Prioridad: **14.05.2007 FR 07 03453**

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:
14.09.2011

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:
14.09.2011

73

Titular/es: **ELECTRICITÉ DE FRANCE**
22-30 avenue de Wagram
75008 Paris, FR

72

Inventor/es: **Couty, Jean-Christophe y**
Esposito, Pascal

74

Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 364 820 T3

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

DESCRIPCIÓN

Combustible nuclear en forma de pastilla, con estructura perfeccionada

La presente invención se refiere a un combustible nuclear destinado a aplicaciones en reactores nucleares.

5 Trata más en particular de un combustible en forma de pastilla destinado a barras de combustible en haz dentro de los reactores, en particular para la producción de electricidad.

A modo de ejemplos de aplicaciones, se pueden citar:

- los reactores de agua a presión (o PWR por « Pressurized Water Reactor »);
- los reactores de agua en ebullición; e incluso
- los reactores de neutrones rápidos.

10 En referencia a la figura 1, en un reactor para una de las aplicaciones del tipo ya citadas, se ensamblan unos tubos CC (denominados « barras de combustible ») por medio de rejillas de retención GR. En cada barra de combustible (figura 2), se introducen una multitud de pastillas de combustible dentro de una funda GA. Las pastillas de combustible son, por ejemplo, de dióxido de uranio UO_2 , eventualmente impurificado. La funda GA está realizada, por ejemplo, en una aleación de circonio. Las pastillas PA se mantienen dentro de la funda mediante unos tapones superior BS e inferior BI y permanecen pegadas las unas a las otras por la presión de al menos un muelle RE.

15 En referencia a la figura 3, dada aquí a título de ejemplo, cada pastilla PA se presenta prácticamente con la forma de un filtro de cigarrillo. Se trata de un cilindro cuyas dimensiones son, por ejemplo, de en torno a 13 milímetros de altura (a lo largo del eje z) y de en torno a 8 milímetros de diámetro. De acuerdo con las aplicaciones, la pastilla PA puede estar hueca o ser maciza. También puede ser solo parcialmente hueca y presentar, por ejemplo, una escotadura. La funda GA, por su parte, es de en torno a 9 milímetros de diámetro y de en torno a 4 metros de altura.

20 De este modo, en un reactor de agua a presión, por ejemplo, el combustible nuclear se presenta en forma de pastillas PA apiladas dentro de las fundas GA encargadas de mantener las pastillas y de retener los productos de fisión para evitar su diseminación en el agua del circuito primario. Las barras de combustible formadas de este modo se disponen en forma de un ensamblado de combustible (por ejemplo, de acuerdo con una red de 17 x 17 barras de combustible) cuya resistencia mecánica está garantizada por las rejillas GR, tal y como se ilustra en la figura 1.

25 La funda GA de cada barra de combustible constituye la primera barrera de protección contra el vertido del producto de fisión nuclear. Esta funda debe mantenerse íntegra en todas las situaciones de funcionamiento normal, así en todos los incidentes puntuales dentro de los reactores del tipo mencionado con anterioridad.

30 Desde el aumento de la potencia del reactor, la reacción de fisión produce una liberación de calor en la pastilla. En la figura 4b se ha representado la distribución de calor dentro de la pastilla PA en comparación con sus dimensiones en la figura 4a (que respeta las proporciones habituales de una pastilla). La distribución de calor, en funcionamiento normal y a plena potencia, es prácticamente parabólica sobre el diámetro de la pastilla con una temperatura de en torno a 1.200 °C en el centro y una temperatura de en torno a 400 °C en los bordes (-R y +R sobre el eje x de la figura 4b, siendo este eje x ortogonal al eje z). El aumento de calor en el centro de la pastilla PA implica, por lo tanto, una deformación radial, por dilatación térmica, que es mayor en los extremos superiores e inferiores de la pastilla. De este modo, en referencia ahora a la figura 5, la pastilla presenta, por el efecto de la dilatación térmica, una forma de « diábolo » con unas protuberancias radiales PR marcadas en particular en los extremos de la pastilla.

35 En la figura 5 se ha representado, con una línea de puntos, la forma inicial de la pastilla (antes del aumento de la temperatura) y, en trazo continuo, la forma de la pastilla dilatada. Se constata en concreto, en los extremos de la pastilla, un aumento de diámetro $\Delta\epsilon$ que viene a añadirse a la dilatación radial ΔR , normal, del centro de la pastilla. Esta sobredilatación $\Delta\epsilon$, más marcada en los extremos inferior y superior de la pastilla globalmente cilíndrica, está ligada a unos efectos de borde en un cilindro de dimensiones finitas.

40 En referencia a las figuras 6a, 6b y 6c, que ilustran un aumento progresivo de la temperatura de las pastillas PA dentro de su funda GA, el aumento marcado del diámetro $\Delta\epsilon$ en los extremos de las pastillas genera de este modo unas tensiones CR en la funda GA. Este efecto solicita mecánicamente a la funda y contribuye a su debilitamiento, el cual es más marcado cuanto mayor es la sobredilatación $\Delta\epsilon$. Por otra parte, se han constatado en las fundas, tras su utilización, pequeñas ondas en su superficie radial con un espaciamiento entre las pequeñas ondas correspondiente a la altura de una pastilla, exactamente tal y como aparece representado en la figura 6.

45 Hay que señalar, por otra parte, en las figuras 6b y 6c, que desde el comienzo del aumento de la temperatura, se forman fisuras FIS en las pastillas de forma aleatoria. En efecto, el gradiente térmico impuesto a la pastilla genera fuertes tensiones de tracción de la pastilla de cerámica, siendo este un material frágil.

50 En referencia ahora a la figura 7, se ha constatado que el aumento suplementario de diámetro $\Delta\epsilon$ estaba ligado a la relación entre la longitud y el diámetro de la pastilla, medida tradicionalmente por la relación h/D de su altura h por su diámetro D. La figura 7 ilustra la variación del aumento suplementario de diámetro $\Delta\epsilon$ en función del factor de

relación entre altura y diámetro h/D. Esta variación presenta un único máximo para una relación entre la longitud y el diámetro h/D con un valor b (que es, por ejemplo, del orden de 0,9 a 1,3). Para unas pastillas de la técnica actual de en torno a 13 milímetros de alto por en torno a 8 milímetros de diámetro, el factor de la relación entre la longitud y el diámetro h/D está próximo a $c = 1,6$ (flecha AA para « técnica anterior » en la figura 7) y el aumento suplementario de diámetro en los extremos de la pastilla, $\Delta\epsilon$, se mantiene elevado, cercano al máximo.

Una solución para limitar la sobredilatación $\Delta\epsilon$ sería prever unos valores de la relación entre la altura y el diámetro h/D inferiores al valor b, por ejemplo próximos a un valor a que podría ser, por lo general, inferior a o del orden de 0,5 (flecha INV para « invención » en la figura 7). Esta realización consistiría entonces en prever, por ejemplo, unas pastillas con una altura de en torno a 3 milímetros para conservar un diámetro de 8 milímetros. Este tipo de pastillas tendría, por lo general, la forma de una pila plana de reloj. Se plantea entonces el problema de la introducción y del apilado de las pastillas dentro de una funda de 4 metros, sin que algunas pastillas al menos rueden y se introduzcan torcidas dentro de la funda.

La presente invención viene a mejorar la situación.

Esta propone, para ello, una pastilla que consta de un material nuclear combustible, con una forma general alargada a lo largo de un eje (por lo general el eje z en el ejemplo representado en la figura 3).

La pastilla de acuerdo con la invención consta, por lo tanto, en su superficie lateral externa de al menos una zona de fractura marcada para favorecer una fractura en un plano prácticamente secante de dicho eje.

Esta zona de fractura marcada es, por lo general, una escotadura marcada en la superficie de la pastilla. Puede tratarse, por ejemplo, de una marca grabada, de una muesca, de una ranura o de cualquier otro tipo, siendo lo esencial que la pastilla de acuerdo con la invención se pueda fisurar, desde el momento en que sube la temperatura, en un plano secante (por ejemplo perpendicular) al eje z de la figura 3.

En una realización ventajosa, la pastilla consta de más de una zona de fractura marcada de tal modo que obtiene un factor de la relación entre la altura y el diámetro de cada trozo, tras la fractura, inferior a o del orden de 0,5, lo que permite disminuir de forma sustancial el parámetro $\Delta\epsilon$ de la figura 7, con respecto a la técnica anterior (flecha AA). En concreto, el número de zonas de fractura marcadas de las que consta la pastilla se puede elegir para favorecer una fractura en múltiples fragmentos, cada fragmento teniendo entonces una relación de la altura por la anchura inferior a o del orden de 0,5.

De este modo, si la pastilla presenta al inicio una relación de altura por anchura superior a o del orden de 1,5, se prevén de forma ventajosa al menos dos zonas de fractura marcada, que pueden, por ejemplo, estar dispuestas prácticamente a una tercera parte o a dos terceras partes de la altura de la pastilla, respectivamente.

En un ejemplo de realización que se describe en detalle a continuación la pastilla consta de tres zonas de fractura marcada para un factor de la relación entre altura y diámetro próximo a 1,6.

Por otra parte, se mostrarán otras características y ventajas de la invención con el análisis de la descripción detallada que viene a continuación y de los dibujos anexos en los que:

- la figura 1 ilustra un ensamblado de combustible nuclear en forma de barras de combustible;
- la figura 2 es una vista en sección de una barra de combustible;
- la figura 3 ilustra una pastilla nuclear dentro de una funda que forma una barra de combustible;
- la figura 4a ilustra las proporciones de una pastilla clásica;
- la figura 4b ilustra una distribución de la temperatura dentro de la pastilla, durante la reacción de fisión nuclear, en funcionamiento normal a plena potencia;
- la figura 5 la dilatación que experimenta una pastilla durante la reacción de fisión, en funcionamiento normal a plena potencia;
- las figuras 6a a 6c ilustran la deformación de las pastillas por el efecto del aumento de la temperatura durante la reacción de fisión nuclear, que implica las tensiones CR impuestas a la funda;
- la figura 7 ilustra una variante de un aumento suplementario de diámetro $\Delta\epsilon$ en los extremos inferior y superior de la pastilla, en función de su factor de la relación entre altura y diámetro h/D;
- las figuras 8a a 8c ilustran diferentes modos de realización de una zona de fractura marcada realizada en una pastilla de acuerdo con la invención;
- la figura 9a ilustra una pastilla que consta de tres zonas de fractura marcada, en un modo de realización ventajoso;
- la figura 9b ilustra la pastilla de la figura 9a durante una reacción de fisión nuclear en el momento de la primera subida de la temperatura de una pastilla nueva de acuerdo con la invención;
- la figura 10a ilustra de forma esquemática una instalación para la aplicación de un procedimiento de formación de las zonas de fractura marcada en las pastillas de acuerdo con la invención; y
- la figura 10b es un vista en sección de un molde de sinterización para la fabricación de pastillas de acuerdo con la invención y que, directamente al acabar el moldeo, consta de unas zonas de fractura marcada.

En la figura 9a se ha representado una pastilla de acuerdo con la invención que consta de una relación de altura por

anchura próxima a 1,6. Se prevén tres zonas de fractura marcada, dispuestas prácticamente a una cuarta parte Z1, a la mitad Z2 y a tres cuartas partes Z3 de la altura h de la pastilla PA, respectivamente. De este modo, durante un primer aumento de la potencia, la pastilla se fisura al menos en cuatro trozos PA1, PA2, PA3 y PA4, tal y como se ilustra en la figura 9b, teniendo cada trozo un factor de la relación entre altura y anchura próximo a 0,4. En referencia a la figura 7, con este factor de la relación entre altura y anchura de 0,4, el aumento suplementario de diámetro $\Delta\epsilon'$ de cada trozo PA1, PA2, PA3 o PA4 es sustancialmente inferior al $\Delta\epsilon$ de una pastilla entera que presenta un factor de alargamiento de 1,6.

En consecuencia, en referencia de nuevo a la figura 9b, con el bajo valor $\Delta\epsilon'$ alcanzado para el conjunto de los trozos PA1 a PA4 que forman la pastilla, las tensiones impuestas a la funda GA se ven reducidas de forma notable.

En referencia a la figura 7, una solución que también parecía ventajosa al experto en la materia para limitar la sobredilatación $\Delta\epsilon$ era seleccionar unos valores de relación entre altura y diámetro h/D superiores al valor máximo b (lo que lleva, por lo tanto, con un diámetro constante, a aumentar la altura de las pastillas). En efecto, la sobredilatación $\Delta\epsilon$ se reduce de nuevo para unas relaciones entre altura y diámetro superiores al valor b. Ahora bien, las fisuras que se crean en la pastilla por lo general pueden generar unos fragmentos cuya relación entre altura y diámetro estaría próxima al valor b, lo que no resuelve el problema que plantea la sobredilatación $\Delta\epsilon$.

Por otra parte, se recuerda, para indicar unas dimensiones absolutas de una pastilla antes de la fractura, que la altura es superior a o del orden de un centímetro, por ejemplo, 13 milímetros de altura por 8 milímetros de diámetro, para ajustarse a las dimensiones clásicas de las pastillas de la técnica actual. De este modo, el procedimiento que pretende apilar las pastillas dentro de la funda GA se mantiene igual y, de manera más general, sin modificar globalmente la forma y las dimensiones de las pastillas, se reduce de forma ventajosa su sobredilatación $\Delta\epsilon$ y, por ello, las tensiones que experimenta la funda GA.

En referencia a la figura 8a, una zona de fractura marcada formada en una pastilla de acuerdo con la invención puede presentar la forma de una muesca ENC realizada como una escotadura en la superficie lateral de la pastilla y que se extiende al menos por un arco de círculo de esta superficie.

En la realización que se ilustra en las figuras 8b y 8c, la muesca se puede prolongar por un círculo completo inscrito en un plano prácticamente perpendicular al eje z de la altura de la pastilla, para formar una ranura R1 o R2 con una profundidad prácticamente constante.

En la realización de la figura 8b, la ranura presenta una forma de U, mientras que en la realización de la figura 8c la ranura presenta una forma de V. El modo de realización de la figura 8c puede ser preferible para provocar de forma muy rápida la fractura de la pastilla, desde el inicio de su aumento de la temperatura. En ese caso, si la pastilla está grabada mediante mecanizado para formar las ranuras R2, se seleccionará un bisel de punta. De forma más general, la forma y/o la profundidad de la ranura R1 o R2 se pueden elegir para provocar la fractura de la pastilla de una forma más o menos rápida. No obstante, las ranuras mecanizadas son cada vez más profundas y la cantidad presente de material nuclear de las pastillas es cada vez mayor, lo que plantea el problema de los materiales nucleares que hay que reciclar.

En la figura 10a se ha ilustrado un ejemplo de procedimiento de mecanizado al que también se refiere la presente invención en el que se graba al menos una zona de fractura marcada Z2 en la pastilla PA, previendo en concreto una recuperación de los desechos del grabado. En esta realización, la pastilla PA se pone a girar, mientras que un bisel en punta BIS se aplica contra la superficie radial externa de la pastilla. De forma ventajosa, el bisel BIS se fija sobre un soporte SU y una boquilla aspiradora BA se fija sobre el mismo soporte SU para recuperar mediante aspiración directa los desechos del mecanizado generados por el grabado. Este material nuclear, recuperado de este modo, se puede reciclar para fabricar, por ejemplo, más pastillas.

Una variante de este modo de formación de zonas de fractura marcada en la pastilla puede consistir en fabricar de forma directa, mediante moldeo, la pastilla PA en una cerámica que consta de un material nuclear combustible, y previendo en concreto un molde MO que consta de al menos una nervadura NE que forma saliente en una pared interna del molde, tal y como se ilustra en la figura 10b. Cada nervadura NE del molde cilíndrico MO aplica una escotadura en la pastilla durante la fabricación mediante sinterización formando de este modo una ranura circular del tipo que se ilustra, por ejemplo, en la figura 8c.

Obviamente, la presente invención no está limitada a la forma de realización que se ha descrito más arriba a título de ejemplo; es extensible a otras variantes.

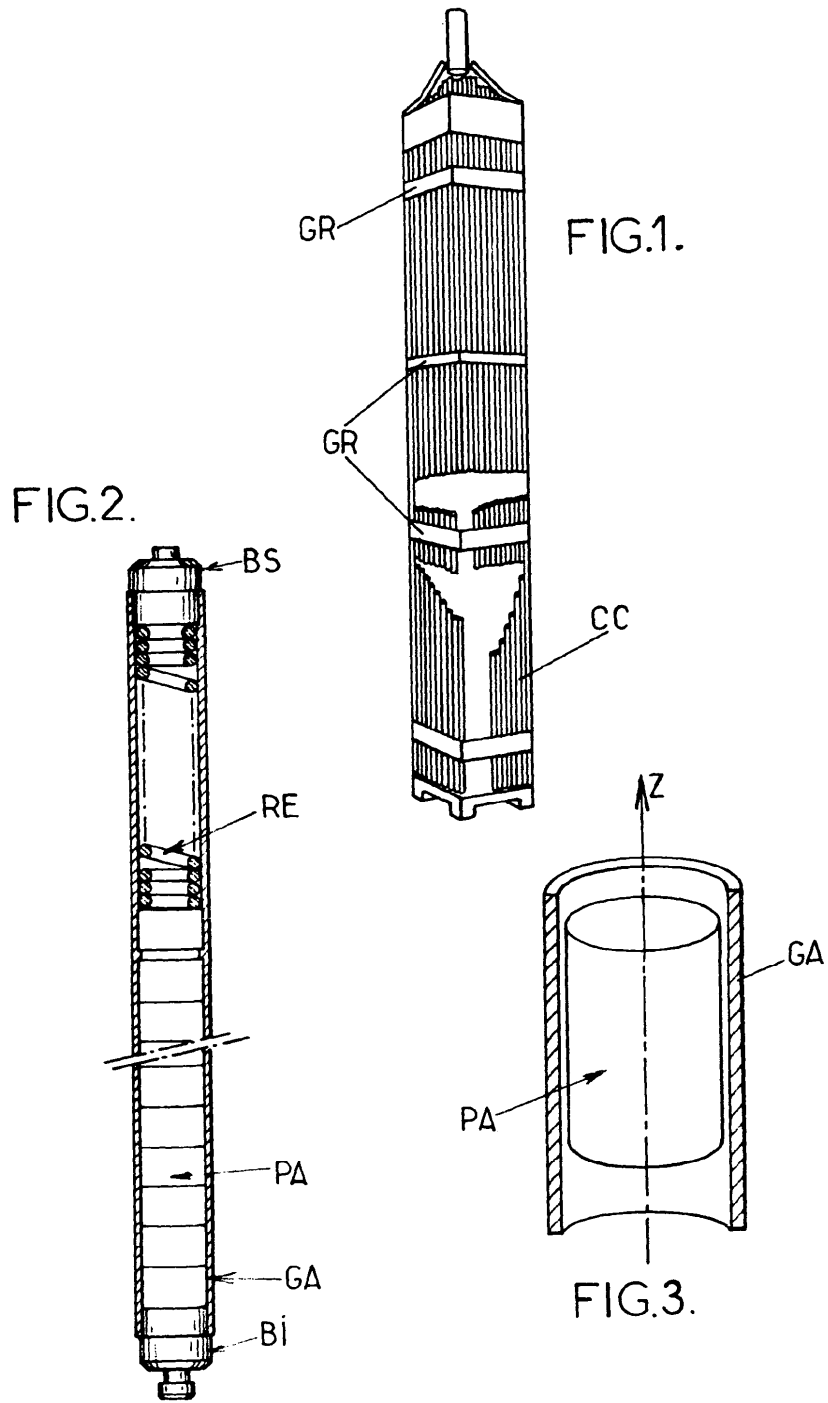
De este modo, se han representado en los dibujos, por ejemplo, pastillas compactas. La invención se aplica sin embargo a todos los tipos de pastillas, en particular a las pastillas huecas. Para la realización de las zonas de fractura marcada en estas pastillas huecas, en la práctica se prevé formar siempre (mediante mecanizado o mediante moldeo tal y como se ha descrito anteriormente) estas zonas en su superficie radial externa.

Por otra parte, se han descrito con anterioridad unas pastillas con una forma general cilíndrica. De forma alternativa, se pueden prever formas diferentes, por ejemplo, oblongas, paralelepípedas u otras formas.

5 Como ya se ha descrito con anterioridad, las ranuras están de preferencia formadas sobre un círculo completo de la superficie externa de una pastilla y se inscriben cada una en un plano perpendicular al eje z de la altura de la pastilla. En principio, cuando la pastilla se rompe, la fractura se inscribe también en el mismo plano perpendicular al eje z y, si la pastilla consta de N ranuras, esta se rompe en N + 1 trozos. No obstante, puede ocurrir que se rompa de forma accidental en más de N + 1 trozos y/o que la fractura no se produzca en un plano perfectamente perpendicular al eje z, sino simplemente en un plano secante a este eje.

REIVINDICACIONES

1. Pastilla que consta de un material nuclear combustible, con una forma general alargada a lo largo de un eje (z), **que se caracteriza porque** consta en su superficie lateral externa de al menos una zona de fractura marcada para favorecer una fractura prácticamente en un plano secante de dicho eje (z).
- 5 2. Pastilla de acuerdo con la reivindicación 1, con una forma prácticamente cilíndrica y con una base prácticamente circular, **que se caracteriza porque** la zona de fractura marcada consta de una muesca (ENC) que se extiende al menos por un arco de círculo.
3. Pastilla de acuerdo con la reivindicación 2, **que se caracteriza porque** la muesca forma una ranura (R1, R2) con una profundidad prácticamente constante.
- 10 4. Pastilla de acuerdo con la reivindicación 3, **que se caracteriza porque** la ranura (R1, R2) se extiende por un círculo completo inscrito en un plano prácticamente perpendicular a dicho eje (z).
5. Pastilla de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **que se caracteriza porque** consta de un número seleccionado de zonas de fractura marcadas para favorecer una fractura en una multitud de fragmentos, teniendo cada fragmento una relación de altura por anchura inferior a o del orden de 0,5.
- 15 6. Pastilla de acuerdo con la reivindicación 5, que implica una relación de altura (h) por anchura (D) superior a o del orden de 1,5, **que se caracteriza porque** consta de al menos dos zonas de fractura marcada (Z1, Z2, Z3).
7. Pastilla de acuerdo con la reivindicación 6, que implica una relación de altura (h) por anchura (D) próxima a 1,6, **que se caracteriza porque** consta de tres zonas de fractura marcada (Z1, Z2, Z3), dispuestas prácticamente a una cuarta parte, a la mitad y a tres cuartas partes de la altura de la pastilla, respectivamente.
- 20 8. Pastilla de acuerdo con una de las reivindicaciones 6 y 7, **que se caracteriza porque** la altura (h) de la pastilla (PA) es superior a o del orden de un centímetro.
9. Procedimiento de fabricación, mediante sinterización, de una pastilla de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en una cerámica que consta de un material nuclear combustible, **que se caracteriza porque** se prevé un molde (MO) que consta de al menos una nervadura (NE) que forma saliente en una pared interna del molde.
- 25 10. Procedimiento de fabricación, mediante mecanizado, de una pastilla de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 8, en la que se graba al menos una zona de fractura marcada en la pastilla, **que se caracteriza porque** se prevé una recuperación (BA) de los desechos del grabado para reciclar.



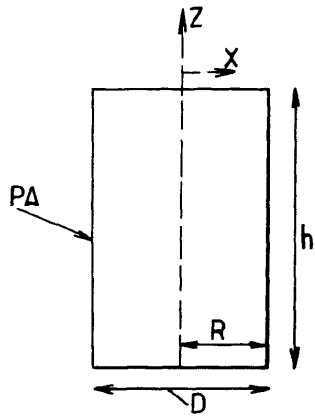


FIG. 4a.

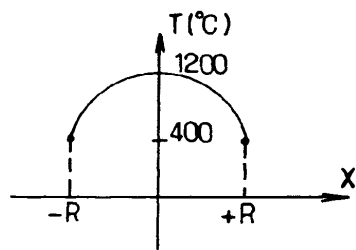


FIG. 4b.

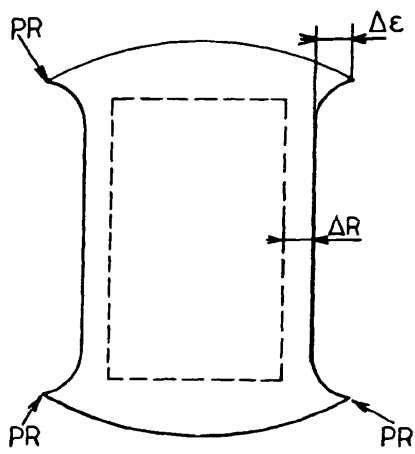


FIG. 5.

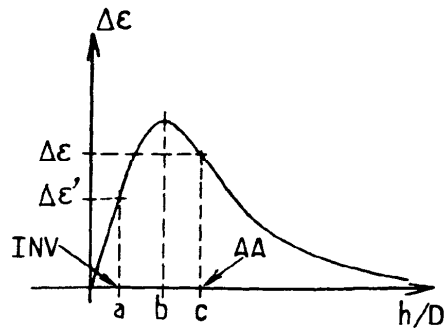


FIG. 7.

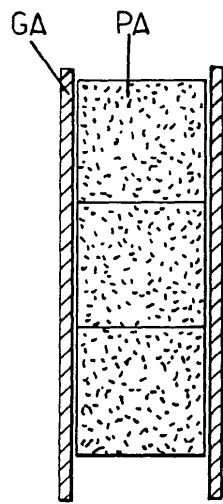


FIG. 6a.

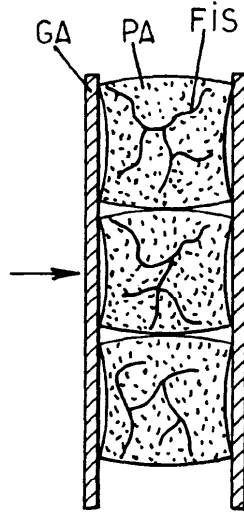


FIG. 6b.

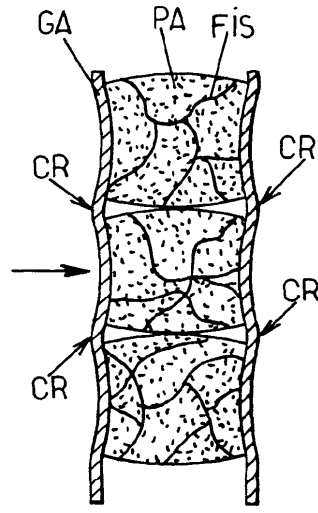


FIG. 6c.

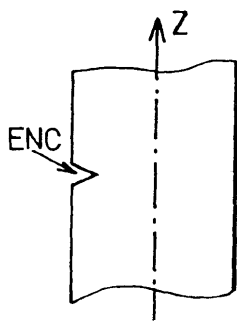


FIG. 8a.

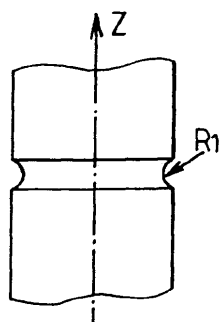


FIG. 8b.

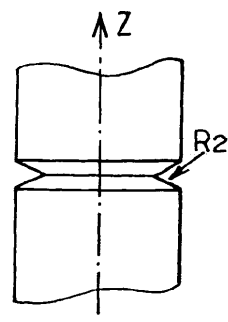


FIG. 8c.

