

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 672 928**

51 Int. Cl.:

C21D 7/06 (2006.01)

B82Y 40/00 (2011.01)

B24C 1/10 (2006.01)

B24C 3/00 (2006.01)

B24C 5/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.12.2011 PCT/FR2011/053210**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.07.2012 WO12089989**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.12.2011 E 11815553 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.03.2018 EP 2659010**

54 Título: **Tratamiento superficial de una pieza metálica por granallado oblicuo**

30 Prioridad:

30.12.2010 FR 1061373

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

18.06.2018

73 Titular/es:

**WINOA (100.0%)
528 Avenue de Savoie
38570 Le Cheylas, FR**

72 Inventor/es:

**PREZEAU, TONY;
MULLER, TEDDY y
SAMUEL, JOAN**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 672 928 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

Tratamiento superficial de una pieza metálica por granallado oblicuo

5 El granallado pretensado es una técnica ampliamente utilizada para mejorar ciertas propiedades de las superficies metálicas, como la resistencia a la fatiga. Un tratamiento de granallado pretensado se caracteriza normalmente por una tasa de revestimiento que califica la proporción de la superficie impactada por el granallado y una intensidad que califica la cantidad de energía cinética aplicada por unidad superficial. La literatura en el campo del granallado pretensado establece los límites de los parámetros, tasa de revestimiento e intensidad, más allá de los cuales el material granallado se expone a degradaciones tales como agrietamiento y reducción de la resistencia a la fatiga. Las condiciones que dan lugar a estas degradaciones se designan comúnmente con el término "overpeening", "martilleado".

10 Las investigaciones posteriores en los tratamientos por granallado ponen de relieve la posibilidad de producir una nanoestructuración del material en una capa superficial al empujar el tratamiento de granallado más allá de los límites normalmente establecidos. Por nanoestructuración, se entiende la obtención de una fase estable cuyo tamaño de grano es del orden de algunas decenas de nanómetros. En ciertas condiciones, se supone que la nanoestructuración del material evita la propagación de microfisuras, de modo que no se producen las degradaciones previstas.

La nanoestructuración del material produce efectos ventajosos, tales como aumento de la resistencia a la fatiga, dureza, resistencia a la corrosión, difusividad atómica, biocompatibilidad, mejora de las propiedades tribológicas y otros.

20 Entre los procedimientos conocidos para producir una capa superficial nanoestructurada, se puede identificar esencialmente:

- técnicas de proyección de partículas finas o muy finas a alta o muy alta velocidad (*Fine Particle Bombarding* o *Air Blast Shot Peening*) con incidencia normal sobre la muestra a tratar. Estas técnicas se presentan especialmente en la publicación del *Iron and Steel Institute of Japan ISIJ Internacional*, vol. 47 (2007), n.º 1, págs. 157-162.
- 25 • técnicas de vibración de partículas más grandes a velocidades inferiores, denominadas *UltraSonic Shot Peening* (granallado ultrasónico) o *Surface Mechanical Attrition Treatment* (tratamiento de desgaste mecánico superficial). Estas técnicas se presentan particularmente en la publicación del *Japan Institute of Metals Materials Transactions*, vol. 45, n.º 2 (2004), págs. 376-379.

30 El documento WO02/10461 describe un procedimiento de generación de nanoestructuras en la superficie de una pieza metálica en el que las perlas perfectamente esféricas similares a las perlas de rodamiento con perlas se proyectan en un punto de impacto de la pieza bajo incidencias variables. Para obtener un espesor de nanoestructuras de algunas decenas a varios centenares de micrómetros, se enseña a someter a un estrés mecánico y/o térmico la superficie de la pieza metálica a tratar.

35 El documento WO 02/10462 describe un procedimiento de generación de nanoestructuras en el que se proyectan perlas sobre un punto de impacto de una pieza en diferentes direcciones de incidencia y variadas por una fuente de proyección de perlas para crear deformaciones con un sentido cualquiera. Un espesor de capa de 10 µm se obtiene con perlas con un diámetro de 300 µm y un espesor de capa de 20 µm se obtiene con perlas con un diámetro de 3 mm.

40 El documento WO 02/10463 describe un procedimiento de generación de nanoestructuras en el que un movimiento de perlas es provocado por la combinación de un movimiento circular de una cámara que contiene las perlas y de un movimiento vibratorio en una dirección perpendicular al plano del movimiento circular de la cámara. Un espesor de capa nanoestructurada de 10 µm se obtiene con perlas con un diámetro de 300 µm y un espesor de capa de 20 µm obtenido con perlas con un diámetro de 3 mm.

45 El documento EP1577401 describe varillas vibratorias que producen impactos en un material. Las velocidades de impacto máximas son iguales a 3,6 m/s.

En un primer modo de realización, el documento JP2003201549 enseña a proyectar un flujo de partículas en una pieza metálica según una incidencia normal. En otro modo de realización, el documento enseña a generar un movimiento vibratorio para realizar proyecciones, lo que implica velocidades de proyección relativamente bajas.

50 Según un modo de realización, la invención proporciona un procedimiento de tratamiento superficial de una pieza metálica como se define en la reivindicación 1.

55 Una idea subyacente de la invención es crear uno o más flujos de partículas adecuadas para golpear una superficie a tratar según incidencias diversas y controladas para aplicar un gran número de planos de deslizamiento atómicos del material. Según un modo de realización, la capa superficial de nanoestructuras presenta un espesor medio superior a 50 µm, el límite de la capa superficial de nanoestructuras se determina como una zona de la pieza metálica en la que la dureza es superior a un umbral que depende del material metálico del que está fabricado la

pieza.

5 Según un modo de realización, dicho umbral dureza se define por un endurecimiento del material con respecto a un estado anterior al tratamiento superficial que es igual a 50 % del endurecimiento obtenido en la superficie tratada de la pieza metálica. En otros casos, este umbral puede ser definido en función de otros parámetros, especialmente la posición de una transición de fase cristalina en el material cuando tiene lugar tal transición.

Según otros modos de realización ventajosos, tal procedimiento puede presentar una o más de las siguientes características.

Según un modo de realización, las partículas presentan un diámetro superior a 0,3 mm e inferior a 1,4 mm.

10 Según un modo de realización, las incidencias de las partículas se distribuyen de manera notablemente continua en el cono o la película cónica.

Según un modo de realización, el cono o la película cónica presenta un semiángulo externo en el vértice comprendido entre 10° y 30°.

15 Según la invención, el flujo de partículas consta de un chorro de partículas proyectado en una dirección central, la pieza metálica está fijada sobre un soporte de manera que presenta dicha superficie orientada de manera oblicua con respecto a dicha dirección central, el soporte gira alrededor de un eje coaxial con la dirección central del chorro de partículas.

Según la invención, la inclinación de la superficie de la pieza con respecto a la dirección central está comprendida entre 10° y 30°, preferentemente cerca de 15°.

Según un modo de realización, las partículas son proyectadas a una velocidad comprendida entre 50 y 80 m/s.

20 Según un modo de realización, las partículas presentan una dureza superior a la dureza de la superficie de la pieza antes del tratamiento.

Según un modo de realización, dicho umbral de dureza se define por un endurecimiento del material con respecto a un estado anterior al tratamiento superficial que es igual a 50 % de endurecimiento obtenido en la superficie tratada de la pieza metálica.

25 Según un modo de realización, la capa superficial de nanoestructuras presenta un espesor medio superior a 100 µm.

Según un modo de realización, la invención también proporciona un dispositivo de tratamiento superficial para una pieza metálica como se define en la reivindicación 9.

30 Algunos aspectos de la invención parten de la idea de diseñar un procedimiento de nanoestructuración del material que presenta una productividad elevada para producir capas superficiales nanoestructuradas relativamente gruesas en un tiempo relativamente corto. Algunos aspectos de la invención parten de la idea de producir capas superficiales nanoestructuradas relativamente homogéneas. Algunos aspectos de la invención parten de la idea de diseñar un procedimiento de nanoestructuración del material que es aplicable a diversas geometrías, en particular las formas cóncavas. Algunos aspectos de la invención parten de la idea de diseñar un procedimiento de nanoestructuración del material que es relativamente fácil y barato de implementar.

35 La invención se entenderá mejor y otros objetivos, detalles, características y ventajas de la misma resultarán más evidentes durante la siguiente descripción de varios modos de realización particulares de la invención, dados únicamente a modo de ilustración y no de limitación, con referencia a los dibujos anexos.

En estos dibujos:

- 40
- La figura 1 es una representación esquemática de un procedimiento de nanoestructuración de una superficie metálica.
 - La figura 2 es una vista esquemática en perspectiva de una máquina de granallado adecuada para llevar a cabo procedimientos según modos de realización de la invención.
 - La figura 3 es una representación esquemática de un chorro de partículas producido por la máquina de la figura 2.
- 45
- La figura 4 es un esquema de funcionamiento de la máquina de la figura 2.
 - La figura 5 es un gráfico que representa la evolución de la dureza de una pieza metálica en función de la profundidad bajo la superficie tratada para varias condiciones de granallado.
 - La figura 6 es un gráfico que representa la evolución del espesor de una capa superficial nanoestructurada en función de la tasa de revestimiento para las condiciones de granallado de la figura 5.
- 50
- La figura 7 es un gráfico que representa la evolución del tiempo de tratamiento en función de la tasa de revestimiento para los diferentes tamaños de granallas.
 - La figura 8 es un gráfico que representa la evolución de la dureza superficial y del espesor de una capa

superficial nanoestructurada en función de la tasa de revestimiento para una condición de granallado.

- La figura 9 es un gráfico que representa la evolución del espesor de una capa superficial nanoestructurada en función de la tasa de revestimiento para los diferentes modos de fijación de la pieza tratada.
- 5 • La figura 10 es un gráfico que representa la evolución del espesor de una capa superficial nanoestructurada en función de la inclinación de un soporte en la máquina de la figura 2 para numerosas condiciones de granallado.
- La figura 11 es un gráfico que representa la evolución de la dureza de las piezas en diferentes materiales metálicos en función de la profundidad bajo la superficie tratada.
- La figura 12 es un gráfico que representa la evolución del espesor de una capa superficial nanoestructurada en función de la tasa de revestimiento para diferentes materiales metálicos.
- 10 • Las figuras 13 y 14 son gráficos que representan la evolución de la dureza superficial y del espesor de una capa superficial nanoestructurada en función de la tasa de revestimiento para dos velocidades de proyección diferentes.
- La figura 15 es un gráfico que representa la evolución de la dureza superficial y del espesor de una capa superficial nanoestructurada en función de la tasa de revestimiento para otra condición de granallado.
- 15 • La figura 16 es una representación esquemática seccional de una pieza tratada por un procedimiento de granallado que representa la zona de influencia de un impacto.
- Las figuras 17 a 20 son fotografías de microscopía óptica de capas superficiales nanoestructuradas.
- La figura 21 es un gráfico que representa la evolución de la dureza de una pieza metálica en función de la profundidad bajo la superficie tratada para varias condiciones de granallado con otro procedimiento de medición de la dureza.
- 20 • La figura 22 es una representación esquemática seccional de una pieza metálica que presenta una capa superficial nanoestructurada en función de la profundidad bajo la superficie tratada en la que se superpone la curva de dureza medida.
- La figura 23 es un gráfico que representa la evolución de la dureza superficial de una pieza tratada por granallado y la evolución del espesor de una capa superficial nanoestructurada en función de la tasa de revestimiento.
- 25

Se describe a continuación los modos de realización de procedimientos de granallado que permiten obtener una capa superficial nanoestructurada en una pieza metálica. A menos que se indique lo contrario, los resultados experimentales presentados a continuación se obtuvieron con muestras metálicas planas.

- 30 Haciendo referencia a la figura 1, se representa esquemáticamente un procedimiento de nanoestructuración de una superficie metálica 1. A la izquierda, antes del tratamiento, el tamaño de los granos 2 del material hasta la superficie 1 es normalmente de unas pocas decenas a unas pocas cientos de μm . A la derecha, después del tratamiento, el tamaño de grano del material en una capa superficial 3 se reduce a unas pocas decenas de nm, por ejemplo aproximadamente 20 nm, mientras que los granos de mayor tamaño siguen existiendo más profundamente en el material. A continuación, se define un eje z perpendicular a la superficie 1 y orientado hacia el interior del material a partir de la superficie. La superficie sirve de referencia de la dimensión. La transición de tamaño de los granos entre la capa superficial 3 y el material profundo no modificado es en realidad más gradual que en el dibujo.
- 35

La nanoestructuración del material en la capa 3 es estable hasta una temperatura de al menos 600 °C. Una pieza metálica recubierta con una capa nanoestructurada puede ser empleada en varias industrias, por ejemplo en aplicaciones en las que la resistencia al desgaste y a la fatiga son propiedades críticas.

40

Haciendo referencia a la figura 2, se describe ahora una máquina de granallado 10 que se puede emplear para producir dicha capa nanoestructurada.

- La máquina 10 consta de una boquilla de proyección 11 suministrada a partir de un depósito de granalla y de un compresor de aire (no representados) para producir un chorro de granalla proyectado a una velocidad V que puede variar según el tamaño de las partículas de granalla. Alternativamente, la proyección de partículas de granalla también puede llevarse a cabo utilizando una turbina con álabes, según la técnica conocida. Los equipos de granallado corrientes permiten obtener velocidades que van de 20 m/s a aproximadamente 120 m/s.
- 45

La granalla empleada está constituida preferentemente de partículas obtenidas por atomización. Tales partículas se pueden producir en grandes cantidades a un coste relativamente ventajoso y presentan una esfericidad bastante buena, por ejemplo superior o igual a 85 %. Su coste es significativamente inferior al de las perlas de rodamiento con perlas cuyo procedimiento de fabricación es casi unitario para lograr una esfericidad superior al 99 %.

50

Alternativamente, otros medios convencionales de granallado se pueden utilizar, tales como alambre cortado esmerilado, perlas de vidrio o perlas de cerámica.

- La boquilla de proyección 11 se fija de forma opuesta a un dispositivo de soporte móvil 12 elaborado de la siguiente manera: un disco metálico 13 se monta en el árbol de un motor giratorio no representado, por ejemplo eléctrico, para poder pivotar con respecto a un marco fijo 19. El eje central pivotante del disco 13 es coaxial con un eje central de proyección de la boquilla 11. En el disco 13 está dispuesto un soporte basculante 14 cuyo ángulo de inclinación con relación al disco 13 es ajustable por medio de un tornillo. Alrededor de una parte central del soporte basculante 14 están fijadas abrazaderas de fijación 15 provistas de tornillos 16 paralelos al soporte 14. Los tornillos 16 pueden ser
- 55

apretados en una pieza a tratar para fijar la pieza entre las abrazaderas 15 y pueden ser aflojados para retirar la pieza después del tratamiento.

5 Haciendo referencia a la figura 3, se representa esquemáticamente un chorro de partículas 20 producido por la boquilla de proyección 11. El chorro 20 presenta una forma aproximadamente cónica con un semiángulo en el vértice β . El ángulo β puede medirse, por ejemplo, como la relación entre el radio ρ de una zona impactada 21 y la distancia L de la zona 21 hasta el orificio 22 de la boquilla 11.

10 Haciendo referencia a la figura 4, se describirá ahora el principio de funcionamiento de la máquina de granallado 10. Para una muestra plana paralela al soporte 14, la parte superficial situada en el eje central 25 del chorro 20 recibe las partículas según un ángulo de incidencia α con respecto a la dirección normal local 26. La parte superficial situada en un borde del chorro 20 recibe las partículas según un ángulo de incidencia $(\alpha-\beta)$ con respecto a la dirección normal local 27. La parte superficial situada en el borde opuesto del chorro 20 recibe las partículas según un ángulo de incidencia $(\alpha+\beta)$ con respecto a la dirección normal local 28.

15 Cuando el dispositivo de soporte 12 gira durante la proyección de las partículas, cualquier parte de la muestra situada en el chorro 20 es golpeada según las incidencias situadas en una película cónica más o menos amplia. Esta película cónica es fina hacia el centro del chorro en el que coincide exactamente con el ángulo α y más ancha hacia la periferia del chorro, en la que se incluye todos los ángulos comprendidos entre $(\alpha-\beta)$ y $(\alpha+\beta)$. Si $\beta \geq \alpha$, la película cónica degenera en un cono. Durante la rotación del dispositivo de soporte 12, una zona de la superficie tratada puede ser golpeada según todos los valores de ángulo de elevación situados en la película cónica. Esta propiedad de la máquina 10 permite producir capas nanoestructuradas sobre diferentes metales con una productividad relativamente elevada, como se hará referencia en los siguientes ensayos. En los ensayos siguientes, el ángulo β equivale a aproximadamente 8° y la distancia L aproximadamente 300 mm. Por supuesto, no se excluye que una pequeña porción de las partículas sean proyectadas según las trayectorias atípicas fuera de las direcciones principales del chorro 20.

25 Los ensayos que se describirán a continuación se realizaron con diferentes tipos de granalla, cuyas principales propiedades se enumeran en la tabla 1 según la norma SAE J444. El diámetro nominal de un tipo de granalla se define como el diámetro medio de la distribución: 50 % en masa de las partículas del tipo de granalla considerado tienen un diámetro inferior al diámetro nominal, y 50 % tienen un diámetro superior.

Tabla 1: propiedades de las granallas según la norma SAE J444

Tipo de granalla	Diámetro nominal (D)	Distribución (fracción de las partículas de tamaño más grande que)													
		0	>85	>96											
S550	1,40	0													
S330	0,85		0	<5		>85	>96								
S280	0,71			0	<5		>85	>96							
S170	0,425					0	<10				>85	>97			
S070	0,18										0	<10		>80	>90
	mm	2,00	1,70	1,40	1,18	1,00	0,85	0,71	0,60	0,50	0,425	0,35	0,30	0,18	0,125

Ensayo 1

La tabla 2 se refiere a los resultados de un primer ensayo llevado a cabo con la máquina 10 en muestras planas de acero E24 (acero de baja aleación: 0,2 % de C, 1,5 % de Mn, 98,2 % de Fe) fijadas por sujeción en el soporte 14 con una inclinación $\alpha = 15^\circ$. En esta tabla se reflejan el tipo de granalla utilizada en el ensayo, la velocidad de proyección V, la tasa de revestimiento R, el espesor de la capa nanoestructurada z_n obtenido, la dureza Vickers de la muestra en su cara expuesta al granallado, la dureza Vickers de la muestra en su cara opuesta, y la relación entre las dos durezas denominada ganancia dureza.

La tasa de revestimiento R es una medida de la proporción de la superficie impactada por el granallado. En la presente descripción, se define según se indica: la referencia 100 % indica que se ha proyectado una cantidad de granalla estadísticamente suficiente para afectar al 98 % de la superficie expuesta. Más allá de 100 %, una ley lineal se aplica con respecto a esta cantidad de referencia. Una tasa de revestimiento de 1.000 %, indica, por tanto, que se proyecta 10 veces la cantidad de referencia. Con un caudal constante, la tasa de revestimiento es por lo tanto también una medida del tiempo de tratamiento de la muestra.

El espesor de la capa nanoestructurada Zn se obtuvo por dos procedimientos: una observación por microscopio óptico y una observación del perfil de dureza del material en función de la profundidad z.

Por microscopía óptica, el espesor medido es una media aritmética de 9 observaciones del espesor de la capa visualmente amorfa que corresponde a la zona nanoestructurada 3. La anchura de la muestra tratada se barrió sobre las tres zonas y 3 mediciones se toman para cada zona, lo que asegura la reproducibilidad del procedimiento de medición.

Las observaciones microscópicas son entonces correlacionadas con perfiles de dureza para confirmar que la zona visualmente amorfa observada corresponde al pico de dureza procedente del endurecimiento por el efecto de los granos nanométricos.

El procedimiento utilizado para realizar el perfil de dureza consiste en efectuar una línea de indentación con un paso de 50 μm a partir del extremo de la superficie con un microdurómetro Vickers con punta piramidal con una carga de 100 g (HV 0,1) que posee un objetivo. La superficie de la muestra y la capa nanoestructurada se muestran como en microscopía óptica. El perfil de dureza es así obtenido con 50 μm a 500 μm de profundidad. Los valores comunicados son una media de 3 líneas de indentaciones para tener una medición fiable y reproducible.

El enlace entre el perfil de dureza y el espesor z_n se puede explicar con más precisión utilizando la figura 5. La figura 5 representa los perfiles de dureza obtenidos por el procedimiento expuesto anteriormente en las muestras del ensayo 1 con R=3.000 %. La curva 30 corresponde a la granalla tipo S170. La curva 31 corresponde a la granalla tipo S280. La curva 32 corresponde a la granalla tipo S330. La curva 33 corresponde a la granalla tipo S550. En todas las curvas 30 a 33, aparece una zona de muy alta dureza 34 que corresponde a la capa nanoestructurada 3 y una segunda zona 35 en la que la dureza disminuye más gradualmente con la profundidad y que corresponde al martillado del material. Por consiguiente, el límite de la capa nanoestructurada 3 debe corresponderse con un fuerte cambio en la pendiente de la dureza. Este punto se verifica en la figura 5 en el que los espesores z_n obtenidos por observación visual se refieren en un trazo mixto para cada tipo de granalla.

Más específicamente, para los cuatro tipos de granalla ensayados en la figura 5, el límite de la capa nanoestructurada 3 observado visualmente corresponde considerablemente a la zona en la que la dureza es igual al valor medio entre el valor de la dureza de la superficie, que está en la presente memoria representado por el primer punto de medición a 50 μm de profundidad, y el valor de dureza lejos de la superficie, en el que el material no se ha visto afectado esencialmente por el granallado, que está representado por el último punto de medición a 500 μm .

Una definición cuantitativa de la capa nanoestructurada 3 puede ser proporcionada en función de la curva de dureza: la capa nanoestructurada 3 es la zona en la que el endurecimiento del material producido por el tratamiento de granallado es superior o igual a 50 % del endurecimiento máximo obtenido en la superficie de la muestra. Esta definición empírica ha sido verificada experimentalmente por las tasas de revestimiento superiores a 750 %, como se explicará a continuación.

La figura 6 representa la evolución del espesor z_n observado visualmente en función de la duración del tratamiento de granallado, medida por la tasa de revestimiento R, por los cuatro tipos de granalla. La curva 36 corresponde a la granalla tipo S170. La curva 37 corresponde a la granalla tipo S280. La curva 38 corresponde a la granalla tipo S330. La curva 39 corresponde a la granalla tipo S550. Las curvas 36 a 39 ponen de manifiesto un umbral de aparición de la capa nanoestructurada 3 y un umbral de saturación de su espesor. En particular, es evidente que el espesor ya no evoluciona de forma significativa más allá del umbral R=3.000 % en el contexto del ensayo 1.

La figura 6 pone de manifiesto que todas las granallas del ensayo 1 permiten obtener un espesor z_n que supera 100 μm o incluso 140 μm . Esta figura también pone de manifiesto dos ventajas de granallas tipo S280 y S330 (curvas 37 y 38). Por una parte, la capa nanoestructurada 3 aparece significativamente con una tasa de revestimiento R inferior, alrededor de 300 %, que con las partículas más grandes (S550) o más pequeñas (S170). Por otra parte, el espesor z_n culmina con un nivel superior al obtenido con partículas más grandes (S550) o más pequeñas (S170).

Se puede considerar sorprendente no obtener un espesor z_n máximo con las partículas más grandes (S550, curva 39). Esta observación, sin embargo, puede explicarse por el efecto de la competencia que existe, cuando el tamaño de los proyectiles aumenta, entre, por una parte, el aumento de la energía cinética por partícula, que implica una deformación plástica del material más profunda y más intensa con cada impacto de partícula, y por otra parte, el aumento de la separación media entre los impactos, que implica una distribución espacial menos regular de los impactos.

Esta competición se ilustra esquemáticamente en la figura 16, en la que la zona de influencia de un impacto, también llamada lóbulo de nanocrystalización está representada por una semiesfera. Mientras que los impactos próximos producen un espesor z_n relativamente uniforme sobre toda la superficie tratada, los impactos relativamente espaciados dan lugar a zonas de borde en las que el material se deforma en un espesor relativamente pequeño z_0 y zonas centrales en las que se deforma el material en un espesor relativamente grande z_1 . El espesor z_n observable se sitúa entre z_0 y z_1 .

Otra propiedad en la que el tamaño de las partículas presenta un efecto observable es la uniformidad del espesor z_n a lo largo de la superficie tratada. Esta propiedad se puede caracterizar por la desviación tipo ℓ del espesor z_n . La tabla 3 se refiere a los valores medidos en las muestras del ensayo 1 cuyas microfotografías se reproducen en las figuras 17 a 19. Para la tasa de revestimiento seleccionada, parece que la granalla más grande tipo S550 proporciona un espesor medio z_n comparable al espesor obtenido con el tipo S330, pero una duplicación de la desviación tipo ℓ . Las figuras 17 a 19 también permiten observar lóbulos de nanocrystalización.

Tabla 3: Desviación tipo del espesor nanoestructurado en el ensayo 1

Fig.	Tipo de granalla	Tasa de revestimiento R(%)	Dureza Vickers de la superficie (HV)	Espesor nano z_n (μm)	Desviación tipo espesor nano ℓ (μm)
17	S170	1.000	263	72,05	11,1
18	S280	1.000	290	119,7	12,5
19	S330	1.000	290	159,76	19,6
20	S550	1.000	292	175,5	40

Además, según la naturaleza de la boquilla de proyección 11, el tiempo requerido para obtener una tasa de revestimiento determinada puede incrementar con el tamaño de las partículas. La figura 7 representa, para un modelo de boquilla convencional de granallado, la evolución de la tasa de revestimiento R con el tiempo de proyección t para dos tamaños de partículas distintos, siendo iguales todas las otras condiciones. La curva 40 se refiere al tipo S550 y la curva 41 al tipo S280. En el ensayo 1, para formar un espesor de 100 μm , es necesario 107s con el tipo S550 contra 30s con el tipo S330 y 75s con el tipo S280. Se observa así que el tipo de granalla óptimo en términos de productividad, es decir, que produce el espesor nanoestructurado más grueso por unidad de tiempo, se sitúa debajo de la granulometría S550.

El ensayo 1 muestra por consiguiente que los efectos contraproducidos de partículas grandes comienzan a manifestarse con la granalla tipo S550 y que no es ventajoso utilizar tamaños más grandes.

La figura 8 pone de manifiesto la relación entre el espesor nanoestructurado z_n y el endurecimiento observado en la superficie de la muestra tratada. La curva 42 representa el espesor z_n (eje izquierdo) y la curva 43 la dureza Vickers de la superficie (eje derecho) en función del revestimiento R para el tipo S280 en el ensayo 1. La curva 43 pone de manifiesto un efecto de martillado que provoca un primer aumento de dureza en una zona 45 a partir de la dureza inicial 44 sin formar granos nanométricos, y un efecto de la nanoestructuración del material que provoca un segundo aumento de la dureza en una zona 46.

Ensayo 2

Para evaluar el efecto eventual del embridado de la pieza mediante abrazaderas de sujeción 15 en el ensayo 1, un ensayo 2 se llevó a cabo con la granalla tipo S280 en condiciones similares al ensayo 1 pegando la muestra en el soporte 14 sin aplicar ningún esfuerzo de apriete. La figura 9 muestra la evolución del espesor z_n en función del revestimiento R en el ensayo 2 (símbolos cuadrados) en superposición con la curva 42 del ensayo 1. No se revela diferencia significativa alguna entre los resultados de dos ensayos, ni en las mediciones de espesor, ni en las mediciones de la dureza, lo que significa que la fijación de la pieza por embridado en el ensayo 1 no tiene una relación causal con los efectos de nanoestructuración observados.

Ensayo 3

Para evaluar el efecto de la orientación de la pieza a tratar en relación con el chorro de granalla, un ensayo 3 se llevó a cabo con granallas tipo S170, S280 y S330 en las condiciones similares al ensayo 1 al variar el ángulo α .

entre 0° y 45° y la rotación del dispositivo de soporte 12. Los espesores nanoestructurados obtenidos en este ensayo 3 se recogen en la tabla 4.

Tabla 4: espesor nanoestructurado en el ensayo 3 para R = 3.000 %

Rotación	α (°)	0	15	30	45	z _n (µm)
Sin	S170	0	97	92	72	
Con		0	130	102	105	
Sin	S280	131	156	134	153	
Con		133	189	171	160	
Sin	S330	111	168	134	144	
Con		116	236	183	125	

5 Se observa para cada tipo de granalla que el espesor z_n varía con el ángulo α para culminar más claramente alrededor de $\alpha = 15^\circ$. También se observa que la rotación del soporte no produce ningún efecto significativo para $\alpha = 0^\circ$, pero aumenta significativamente el espesor z_n cuando se inclina el soporte. Estas observaciones muestran que la producción de impactos de partículas según las diversas incidencias en cualquier punto de la superficie tratada aumenta considerablemente la productividad del procedimiento de nanoestructuración. En particular, estas incidencias se distribuyen en un cono o una película cónica que presenta un semiángulo externo en el vértice comprendido entre aproximadamente 10° y 45° en el contexto de este ensayo.

La figura 10 representa gráficamente los resultados de la tabla 4 con rotación del soporte. La curva 50 corresponde a la granalla tipo S170. La curva 51 corresponde a la granalla tipo S280. La curva 52 corresponde a la granalla tipo S330.

15 Para evaluar el efecto de la naturaleza del material tratado en el procedimiento de nanoestructuración, otros ensayos se llevaron a cabo con diferentes materiales. Teóricamente, los diferentes materiales presentan una receptividad diferente a la deformación plástica severa y por lo tanto a los mecanismos de nanocristalización. El procedimiento de refinamiento de granos bajo una deformación plástica severa depende de muchos factores intrínsecos y extrínsecos, como la estructura y la energía de defecto de apilamiento (*Stacking Fault Energy* SFE) del material. Cuanto más material presenta una energía EDA elevada, por ejemplo como el hierro puro, más difícil resulta la activación de diferentes planos de deslizamiento y la generación de dislocaciones necesarias para los procedimientos de refinamiento de granos. La estructura cristalográfica del metal y la posible presencia de otros elementos como carbono u otros elementos de aleación, en particular en forma de precipitados que favorecen la formación de dislocaciones, tienen por tanto una influencia sobre la productividad del procedimiento de nanoestructuración.

25 Ensayo 4

Un ensayo comparativo se llevó a cabo con muestras de acero inoxidable 304L y un acero de estructura 32CDV13 en condiciones similares al ensayo 1 con la granalla tipo S280. La figura 11 ilustra los resultados de estos ensayos en términos de perfil de dureza para R=3.000 % en una representación similar a la figura 5. La curva 53 corresponde al acero inoxidable 304L. La curva 54 corresponde al acero de estructura 32CDV13. Los perfiles de dureza de estos materiales corresponden a las tendencias observadas en el ensayo 1. Las zonas 34 y 35 de la figura 11 tienen el mismo significado que en la figura 5. La curva 31 del ensayo 1 (acero E24) se indica a modo de comparación. Los espesores z_n observados son visualmente 143 µm para E24, 176 µm para el acero de estructura 32CDV13 y 155 µm para el acero inoxidable 304L.

35 Todavía se observa una vez la validez de la definición cuantitativa empírica dada anteriormente para las curvas 54 y 31.

Esta definición corresponde a la curva 53 (acero 304L) cuando se selecciona la referencia para el endurecimiento a una profundidad de 300 µm. La elección de referencia se explica por el cambio de microestructura específica con acero 304L, durante el granallado del material, y más particularmente en una primera etapa de granallado correspondiente a una etapa de martillado del material.

40 En la primera etapa de granallado del material, una cierta cantidad de austenita del acero 304L se transforma en martensita por martillado. Esta transformación a martensita por martillado conduce a un aumento significativo de la dureza. En la curva 53, una reducción significativa de la dureza es visible entre 300 y 350 µm. Esta disminución de la dureza corresponde en general a la zona de transición de fase austenítica y la fase que tiene un alto contenido de martensita por martillado. En una segunda etapa, la capa nanoestructurada 3 aparece en la fase martensítica. Así, a partir de un espesor superior a 350 µm, la muestra de acero 304L presenta su dureza de origen austenítico y para un espesor inferior a 300 µm, la dureza del material aumenta por la capa nanoestructurada y por la presencia de martensita por martillado. Por lo tanto, la dureza de referencia utilizada para determinar la capa nanoestructurada es

la dureza en las capas más profundas de la martensita por martillado, que es en este caso de 300 μm .

Ensayo 5

5 Un ensayo comparativo se llevó a cabo con muestras de hierro puro con 0,03C (99,8 % de Fe) en condiciones similares al ensayo 1 con la granalla tipo S170. El hierro puro se supone que es uno de los materiales menos favorables al refinamiento de los granos debido a su estructura ferrítica y a su alta energía EDA (alrededor de 200 mJ/m^2). La curva 55 de la figura 12 representa el espesor z_n resultante de este ensayo, observado visualmente, en función de la tasa de revestimiento R. La curva 36 del ensayo 1 (acero E24) se indica a modo de comparación.

10 Por tanto, se confirmó que el acero E24 se nanocrystaliza más rápidamente (aparición de la capa nanoestructurada a $R=750\%$) que el hierro puro (aparición de la capa nanoestructurada a $R=1.000\%$) y posee una capa nanoestructurada más gruesa ($z_n=130\ \mu\text{m}$ contra $z_n=100\ \mu\text{m}$) hasta la saturación. El ensayo 5 muestra que el procedimiento permite obtener capas nanoestructuradas más gruesas que 100 μm para la mayoría de los materiales más viables.

Ensayo 6

15 Para evaluar el efecto de las partículas más pequeñas, se han llevado a cabo ensayos con muestras de hierro puro a 0,03C (99,8 % de Fe) y granallas tipo S070. Otras condiciones son similares al ensayo 1.

20 La figura 13 ilustra los resultados obtenidos con una velocidad de proyección $V = 60\ \text{m/s}$ en una representación similar a la figura 8. La curva 60 representa la dureza Vickers en la superficie y la curva 61 el espesor z_n observado visualmente. Se observa que el espesor z_n se satura a un nivel cercano a 60 μm de $R=3.000\%$. Con partículas pequeñas como el tipo S070, esta tasa de revestimiento se puede lograr rápidamente, por ejemplo en menos de 300 s con un material de granallado corriente.

La figura 14 ilustra los resultados obtenidos con una velocidad de proyección $V = 92\ \text{m/s}$ en una representación similar a la figura 8. La curva 62 representa la dureza Vickers en la superficie y la curva 63 el espesor z_n . Se observa que el espesor z_n se satura a un nivel cercano de 80 a 90 μm de $R=3.000\%$.

25 Estos resultados se comparan con los presentados en la figura 4 de la publicación ISIJ Internacional antes citada, en el que la aleación Fe-3.3Si utilizada presenta una estructura cristalina ferrítica comparable a Fe-0.03C. El ensayo 6 demuestra la obtención de un espesor nanoestructurado más elevado con una tasa de revestimiento, un tamaño de partículas y una velocidad de proyección más bajas en esta publicación. Cabe destacar que una comparación de la tasa de revestimiento requiere una calibración debido a las diferentes definiciones en los dos casos. El uso de una velocidad de proyección inferior puede resultar ventajoso reducir la rugosidad de la muestra tratada o preservar un material más vulnerable a los microagrietamientos.

Ensayo 7

Un ensayo 7 se llevó a cabo con muestras de hierro puro a 0,03C (99,8 % Fe) y granallas tipo S170. Otras condiciones son similares al ensayo 1.

35 La figura 15 ilustra los resultados obtenidos con una velocidad de proyección $V = 57\ \text{m/s}$ en una representación similar a la figura 8. La curva 64 representa la dureza Vickers en la superficie y la curva 65 el espesor z_n . Los números 44, 45 y 46 tienen el mismo significado que en la figura 8. Se observa que el espesor z_n se satura a un nivel cercano a 100 μm .

Ensayo 8

40 Una segunda serie de experimentos se describirá a continuación. En esta segunda serie de ensayos, los perfiles de dureza de las muestras se midieron con un procedimiento más preciso para proporcionar una definición de la capa nanoestructurada basada únicamente en la curva de dureza del material.

La tabla 3 presenta los resultados de la segunda serie de ensayos realizada según las mismas condiciones que en el ensayo 1 presentado en la tabla 2.

45 El procedimiento utilizado para conseguir el perfil de dureza en la segunda serie de ensayos consiste en efectuar una línea de indentación con un paso de 10 μm a partir de 20 μm del extremo superficial hasta una profundidad de 100 μm . La línea de indentación continúa con un paso de 50 μm hasta 300 μm de profundidad. La línea de indentación está realizada con un microdurómetro Vickers con punta piramidal con una carga de 25 g (HV 0,025), que posee un objetivo. Se trata de un microdurómetro Buehler Micromet 5104 que comprende una mesa motorizada que presenta un paso de 1 μm y un software de control y de medición Buehler Omnimet Mhtsa. El perfil de dureza se obtiene así de 20 μm a 300 μm de profundidad. Los valores comunicados son una media de tres líneas de indentaciones para tener una medición fiable y reproducible. De la misma manera que en los ensayos precedentes, la superficie de las muestras y la capa nanoestructurada se visualizan por microscopía óptica. La observación de las muestras se efectúa utilizando un microscopio Zeiss axio scope A1, de una cámara QImaging Micropublisher 5.0 RTV, de un objetivo Zeiss EC EPIPLAN X10/0.2HD y del software Axiovision 4.8.

- Las primeras tres columnas de la tabla 3 corresponden a las tres primeras columnas de la tabla 2. La cuarta columna menciona el espesor de la capa nanoestructurada, denotada z_{nh} por referencia a la dureza (*hardness*). De hecho, en el ensayo 8, el espesor de la capa nanoestructurada z_{nh} se obtuvo por un procedimiento basado únicamente en el perfil de dureza en función de la profundidad z . Para ello, un umbral de dureza se determina calculando el valor medio de la dureza entre la dureza medida en la capa superficial y la dureza de la muestra en la capa profunda en la que el material no es modificado considerablemente por el granallado.
- El espesor de la capa nanoestructurada z_{nh} corresponde a la profundidad en la que el aumento de la dureza es igual a la mitad del aumento de la dureza observada en la superficie de la muestra después del tratamiento de esta superficie.
- La quinta y la sexta columna mencionan la dureza de la superficie de la muestra en la cara tratada y en la cara no tratada. Estos valores corresponden a los primeros puntos de medición de la curva de dureza medida, es decir, a 20 μm de profundidad. En general, se mide la dureza más cerca de la superficie que en el ensayo 1, de modo que el valor de la dureza es más elevado que en la tabla 2. De hecho, el tamaño de los granos cerca de la superficie varía según un gradiente. Por lo tanto, en una zona de extremo superficial, el tamaño de los granos varía entre 10 y 50 nm y, en una zona más profunda, el tamaño de los granos varía de unas pocas decenas de nanómetros a varios cientos de nanómetros. Además, se mide la dureza con una carga mayor en el ensayo 1 que en el ensayo 2. La cavidad del molde realizada en el material presenta por lo tanto mayores dimensiones en el ensayo 1 y genera por lo tanto una medición menos precisa.
- La última columna de la tabla 3 menciona el margen de incertidumbre de la medición del espesor z_{nh} resultante del margen de incertidumbre del microdurómetro. De hecho, las mediciones de dureza presentan una incertidumbre de aproximadamente ± 10 Vickers para el acero E24, $\pm 9,5$ Vickers para el acero 32CDV13 y $\pm 13,5$ Vickers para el acero 304L. Para obtener una mejor precisión de la medición de la dureza, la carga del durómetro se adapta en función de la dureza del material: una carga más grande se utiliza para materiales más duros. Por lo tanto, una carga de 50 g (0,050 HV) se utiliza para el acero 32CDV13 y para el acero 304L.
- La figura 21 representa los perfiles de dureza obtenidos por el procedimiento descrito anteriormente para las muestras correspondientes a las muestras de ensayo 1 con $R=3.000\%$. La curva 70 corresponde a la granalla tipo S170. La curva 72 corresponde a la granalla tipo S330. La curva 73 corresponde a la granalla tipo S550. En todas las curvas 70, 71 y 73, aparece una zona de alta dureza que corresponde a la capa nanoestructurada 3 y una segunda zona en la que la dureza disminuye más gradualmente con la profundidad y que corresponde al martillado del material.
- A modo de ejemplo, en la figura 21, el valor de dureza 74 medido en la capa profunda y el valor de dureza máximo 75 medido en la capa superficial de la muestra asociado con la curva 70 son respectivamente iguales a 142 y 300 Vickers. El umbral 71 correspondiente presenta un valor de 221 Vickers, lo que corresponde al valor medio entre el valor de dureza 74 medido en la capa profunda de la muestra y el valor de dureza máximo 75 medido en la capa superficial de la muestra.
- Este umbral permite determinar un espesor z_{nh} de la capa nanoestructurada de un valor aproximadamente igual a 81,5 μm para el ensayo correspondiente a la granalla S170.
- Un intervalo de incertidumbre del espesor z_{nh} de la capa nanoestructurada es así determinado a partir del umbral de dureza y del intervalo de incertidumbre de dureza. A modo de ejemplo, para el umbral 71 de 221 Vickers presentado anteriormente, se indican los valores límite del espesor de la capa nanoestructurada para los valores de dureza 85 y 86, de respectivamente, 231 Vickers y 211 Vickers. Por lo tanto, el espesor de la capa nanoestructurada se sitúa en un intervalo de aproximadamente 69 a 92 μm . Los intervalos de incertidumbre del espesor de la capa nanoestructurada se presentan en la tabla 3. Por lo tanto, debido a la incertidumbre de la dureza, el espesor de la capa nanoestructurada medida gráficamente representa también una incertidumbre medible.
- Como se ha indicado anteriormente, el segundo procedimiento de medición basado en la dureza coincide satisfactoriamente con el procedimiento de determinación visual: la figura 22 representa esquemáticamente las zonas observadas en las fotografías de microscopía óptica de la muestra correspondiente a la curva 70 de la figura 21 (granallado S170 a $R=3.000\%$). El perfil de dureza 70 en función de la profundidad z desde la superficie de la muestra se refiere a la representación esquemática de estas zonas.
- Se observa, en la figura 22, una capa superficial nanoestructurada 77 que corresponde a una zona en la que el material es considerablemente amorfo y homogéneo. La capa 77 corresponde a la zona más oscura observada en las figuras 17 a 19. La capa 77 se extiende desde la superficie 76 de la pieza a una segunda capa 78. Esta segunda capa 78 se corresponde con la zona en la que se observa uniones de granos y en la que el tamaño de los granos delimitados por las uniones de los granos aumenta con la profundidad. En las fotografías de microscopía óptica, la capa 78 corresponde a la zona que se extiende a partir de un cambio brusco de contraste que parte de la capa 77. Esta segunda capa 78 corresponde a la zona de martillado del material. Una tercera capa 79 comprende una zona en la que el tamaño de los granos se mantiene constante. El umbral de dureza 71 coincide considerablemente con el límite 84 observado visualmente entre la capa superficial nanoestructurada 77 y la capa 78.

La diferencia entre los valores de espesor z_n observados indicados visualmente en la tabla 2 y los valores de espesor z_{nh} indicados en la tabla 3 proviene esencialmente del margen de incertidumbre relativamente elevado de las medidas mencionadas en la tabla 2 normalmente del orden de $\pm 30 \mu\text{m}$. En realidad, las observaciones visuales indicadas en la tabla 2 engloban una parte de la capa de transición 78, lo que explica los valores de espesor más elevados.

El procedimiento de medición de espesor basado en la dureza descrito anteriormente puede presentar una desviación con la observación óptica cuando el espesor de la capa nanoestructurada es fina, lo que corresponde al caso de las muestras de ensayo 8 con una tasa de revestimiento inferior a 750 %. Otro procedimiento de determinación del espesor de la capa nanoestructurada se puede entonces utilizar. Este procedimiento alternativo se basa también en el principio de determinar el espesor de la capa nanoestructurada a partir de un umbral de dureza. Este procedimiento parte de la observación de que, cuando aparece en la muestra y por lo tanto cuando presenta un espesor muy fino, la capa nanoestructurada 3 presenta un valor de dureza superficial que corresponde a este umbral. A modo de ilustración, con referencia a la figura 23, la curva 80 representa el espesor de la capa nanoestructurada en función del revestimiento y la curva 81 representa la dureza de la superficie de la muestra en función del revestimiento para el ensayo de granallado S170. Un espesor mínimo detectable 82 de la capa nanoestructurada aparece para una revestimiento de 150 %. No obstante, la dureza superficial 83 medida durante esta aparición en la capa nanoestructurada es de 226 Vickers. Este umbral de dureza de 226 constituye un valor realista del umbral para determinar el espesor de la capa nanoestructurada tras un tratamiento con un revestimiento inferior a 750 %. Este valor alternativo presenta un valor cercano al umbral de dureza determinado utilizando el valor medio a $R=3.000 \%$ (221 Vickers). En el ensayo 8 indicado en la tabla 3, los umbrales de dureza se determinaron con este otro procedimiento para los valores de revestimiento inferiores a 750 %. En la tabla 3, los valores determinados con este otro procedimiento constan de un asterisco.

Estos resultados se comparan con los presentados en las figuras 3(a) y 4(b) de la publicación *Materials Transactions* citada anteriormente. En particular, se obtienen espesores más elevados en un tiempo mucho menor y con un procedimiento mucho más flexible que el granallado por ultrasonidos GP para el mismo tamaño de granalla.

Aunque los resultados presentados anteriormente se obtienen con muestras metálicas planas, los procedimientos implantados son aplicables a piezas metálicas de cualquier forma. En particular, para tratar una superficie no plana, es posible tratar sucesivamente porciones limitadas de la superficie no plana, al orientar cada vez la porción de superficie tratada de manera que las condiciones de ángulo descritas anteriormente con referencia a la superficie plana son aproximadamente respetadas para cada porción sucesiva de la superficie no plana. Por porción sucesiva, se entiende en la presente memoria una porción superficial relativamente pequeña en relación con el radio de curvatura local, de modo que una orientación media de la porción superficial se puede definir, y relativamente grande en comparación con el tamaño de las granallas proyectadas por lo que un gran número de impactos es estadísticamente factible.

Algunas geometrías no planas son capaces de producir impactos múltiples de una misma partícula en la pieza, es decir, rebotes. Sin embargo, dado que los rebotes conllevan pérdidas de energía muy altas, se supone que es la incidencia principal de la partícula, es decir, la incidencia antes del primer impacto en la pieza que es la más significativa.

Sin embargo no se desea o incluso posible de realizar las condiciones citadas para cada porción de la superficie de la pieza a tratar, es preferible identificar las partes de la pieza metálica destinadas a ser las más solicitadas en su uso final, que se llamará las superficies de trabajo de la pieza. Por ejemplo, las superficies de trabajo de un piñón de engranaje son generalmente fondos de dientes. El tratamiento de nanoestructuración de un piñón se puede conseguir, en un modo de realización particular, al orientar sucesivamente las superficies de fondo de diente opuesto al chorro de la partícula, a fin de lograr la orientación particular de las incidencias primarias de las partículas en la superficie de fondo de diente.

Una sola boquilla de proyección se ha presentado en el modo de realización de la máquina de la figura 2. Sin embargo, también es posible diseñar una máquina de granallado con múltiples boquillas de proyección. Estas boquillas de proyección pueden en particular estar dispuestas de manera que cubran la misma superficie de la pieza según varias incidencias diferentes. Las boquillas de proyección también pueden estar dispuestas para cubrir diferentes superficies de la pieza a tratar.

Otras disposiciones relativas de las boquillas de proyección y del soporte de la pieza son posibles para producir incidencias primarias de partículas que se distribuyen en un cono o una película cónica que presenta un semiángulo externo en el vértice comprendido entre 10° y 45° . En particular, un desplazamiento puede lograrse en las boquillas de proyección.

Aunque la invención se ha descrito en relación con varios modos de realización particulares, resulta evidente que no está limitada y que comprende todos los equivalentes técnicos de los medios descritos así como sus combinaciones si están dentro del ámbito de la invención.

En particular, los modos de realización descritos en los ejemplos se refieren a materiales inicialmente homogéneos

5 en el que los procedimientos de granallado descritos permiten formar capas superficiales nanoestructuradas relativamente gruesas. Es posible caracterizar la tasa de revestimiento aplicada a un material dado por el espesor de la capa nanoestructurada que este revestimiento ha permitido obtener. Por lo tanto, la aplicación de una tasa de revestimiento similar a un material que se ha sometido a otros tratamientos previos también es capaz de producir eficazmente capas superficiales nanoestructuradas, incluso si este material pretratado no se corresponde con los ejemplos descritos, por ejemplo, un material heterogéneo.

10 El uso del verbo "constar", "comprender" o "incluir" y sus formas conjugadas no excluye la presencia de otros elementos u otras etapas distintos de los indicados en una reivindicación. El uso del artículo indefinido "un" o "una" para un elemento o una etapa no excluye, a menos que se indique lo contrario, la presencia de una pluralidad de tales elementos o etapas. Varios medios o módulos pueden ser representados por un mismo elemento material.

En las reivindicaciones, cualquier signo de referencia entre paréntesis no se interpretará como una limitación de la reivindicación.

Tabla 2: ensayo 1, acero E24, dureza Rockwell de las granallas = 48 HRC

Tipo de granalla	V (m/s)	R (%)	z _n (µm)	Dureza cara tratada (HV)	Dureza cara no tratada (HV)	Ganancia dureza (%)
S170	57	100	0	198	108	83 %
		150	0	211	114	85 %
		200	0	200	113	77 %
		300	0	212	111	91 %
		500	0	241	112	115 %
		750	69	256	108	137 %
		1.000	72	263	111	137 %
		1.500	91	274	116	136 %
		3.000	129	308	113	173 %
		6.000	138	309	113	173 %
		10.000	140	302	116	160 %
S280	52	100	0	215	130	65 %
		150	0	224	132	70 %
		200	0	224	138	62 %
		300	67	247	139	78 %
		500	91	262	137	91 %
		750	101	278	138	101 %
		1.000	120	290	113	157 %
		1.500	134	295	116	154 %
		3.000	143	298	114	161 %
		6.000	178	301	113	166 %
		10.000	172	215	114	176 %
S330	60	100	0	213	114	87 %
		150	0	233	116	101 %
		200	0	234	110	113 %
		300	111	264	111	138 %
		500	112	253	108	134 %
		750	142	282	114	147 %
		1.000	160	290	114	154 %
		1.500	175	298	112	166 %

(continuación)

Tipo de granalla	V (m/s)	R (%)	z_n (μm)	Dureza cara tratada (HV)	Dureza cara no tratada (HV)	Ganancia dureza (%)
S330	60	3.000	192	310	123	152 %
		6.000	193	300	131	129 %
		10.000	186	304	142	114 %
S550	49	100	0	206	129	60 %
		150	0	216	144	50 %
		200	0	223	131	70 %
		300	0	227	135	68 %
		500	0	243	145	68 %
		750	104	278	148	88 %
		1.000	176	292	147	99 %
		1.500	168	279	153	82 %
		3.000	164	292	159	84 %
		6.000	175	295	157	88 %
10.000	173	308	167	84 %		

Tabla 3: Ensayo 8, muestras correspondientes al ensayo 1, acero E24, dureza Rockwell de las granallas = 48HRC

Tipo de granalla	V (m/s)	R (%)	z_{nh} (μm)	Dureza cara tratada (HV)	Dureza cara no tratada (HV)	Ganancia dureza (%)	z_{nh} min. (μm)	z_{nh} máx. (μm)
S170	57	100	0,00	225	142	58 %		
		150	0,00	226	133	70 %		
		200	27,46*	234	140	67 %		
		300	30,28*	252	143	76 %		
		500	46,47*	276	132	109 %		
		750	50,00*	281	135	108 %		
		1.000	54,22	288	140	106 %	49,29	62,67
		1.500	59,15	290	140	107 %	57,74	74,64
		3.000	81,69	292	131	123 %	69,01	92,25
		6.000	94,36	323	135	139 %	90,84	96,47
10.000	87,32	327	127	157 %	73,23	95,77		
S330	60	100	0,00	240	136	76 %		
		150	35,21*	244	136	79 %		
		200	34,50*	253	139	82 %		
		300	39,43*	260	135	93 %		
		500	67,60*	267	129	107 %		
		750	69,71	284	128	122 %	61,26	90,14
		1.000	76,05	297	129	130 %	69,01	96,47
		1.500	111,26	299	126	137 %	102,11	121,83
		3.000	111,97	309	128	141 %	97,88	123,23

ES 2 672 928 T3

(continuación)

Tipo de granalla	V (m/s)	R (%)	Z _{nh} (µm)	Dureza cara tratada (HV)	Dureza cara no tratada (HV)	Ganancia dureza (%)	Z _{nh} min. (µm)	Z _{nh} máx. (µm)
S330	60	6.000	123,94	310	157	97 %	109,50	139,43
		10.000	97,14	310	126	146 %	90,00	113,57
S550	49	100	0,00	222	135	64 %		
		150	0,00	225	139	62 %		
		200	0,00	227	141	61 %		
		300	29,57*	240	144	67 %		
		500	44,36*	248	128	94 %		
		750	57,74*	261	141	85 %		
		1.000	98,59	271	134	102 %	76,76	161,97
		1.500	108,45	2889	148	95 %	81,69	133,09
		3.000	97,18	295	132	123 %	83,80	146,47
		6.000	115,00	309	142	118 %	85,71	140,00
		10.000	119,28	325	144	126 %	98,57	150,00

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de tratamiento superficial de una pieza metálica, que comprende:

5 exponer una superficie (1) de la pieza metálica a un flujo (20) de partículas con una esfericidad superior o igual a 85 %, de modo que dicha superficie reciba dichas partículas según varias incidencias primarias, las incidencias primarias de las partículas en la superficie se distribuyen en un cono o una película cónica que presenta un semiángulo externo en el vértice comprendido entre 10° y 45°, hasta la obtención de una capa superficial (3) de nanoestructuras,

10 las partículas presentan un diámetro inferior a 2 mm y superior a 0,1 mm y son proyectadas a una velocidad comprendida entre 40 m/s y 100 m/s; en el que el flujo de partículas consta de un chorro de partículas (20) proyectado en una dirección central (25), la pieza metálica está fijada sobre un soporte (14) de modo que la inclinación α de la superficie expuesta al flujo (20) de partículas con respecto a la dirección central (25) está comprendida entre 10° y 30°, el soporte (14) o el medio de proyección (11) gira alrededor de un eje coaxial con la dirección central del chorro de partículas.

15 2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la inclinación α de la superficie expuesta al flujo (20) de partículas con respecto a la dirección central (25) es de 15°.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, en el que las partículas presentan un diámetro superior a 0,3 mm e inferior a 1,4 mm.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que las incidencias de las partículas se distribuyen de forma continua.

20 5. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el cono o la película cónica presenta un semiángulo externo en el vértice comprendido entre 10° y 30°.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, en el que las partículas son proyectadas a una velocidad comprendida entre 50 y 80 m/s.

25 7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que las partículas presentan una dureza superior a la dureza de la superficie de la pieza antes del tratamiento.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el chorro de partículas presenta una forma cónica que tiene un semiángulo en el vértice β más pequeño que la inclinación de la superficie α .

9. Dispositivo de tratamiento superficial para una pieza metálica, que comprende:

30 un medio de proyección (11) capaz de producir un flujo de partículas con una esfericidad superior o igual a 85 % y que presentan un diámetro inferior a 2 mm y superior a 0,1 mm y proyectadas a una velocidad comprendida entre 40 m/s y 100 m/s, el medio de proyección (11) es capaz de producir un chorro de partículas (20) proyectado en una dirección central (25),

un soporte (12) capaz de retener una pieza metálica, el soporte consta de una superficie (14) expuesta al flujo de partículas,

35 un actuador capaz de modificar una orientación del soporte con respecto al flujo de partículas de modo que las incidencias primarias de partículas sobre una superficie del soporte se distribuyen en un cono o una película cónica que presenta un semiángulo externo en el vértice comprendido entre 10° y 45°, la superficie de soporte (14) está orientada de manera oblicua con respecto a dicha dirección central, de modo que la inclinación α de la superficie de la pieza metálica expuesta al flujo (20) de partículas con respecto a la dirección central (25) se comprende entre 10 y 30°, el actuador es capaz de girar el soporte o el medio de proyección (11) alrededor de un

40 eje coaxial con la dirección central del chorro de partículas.

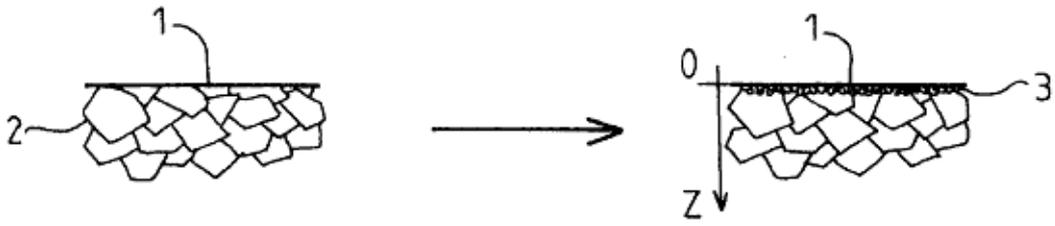


FIG. 1

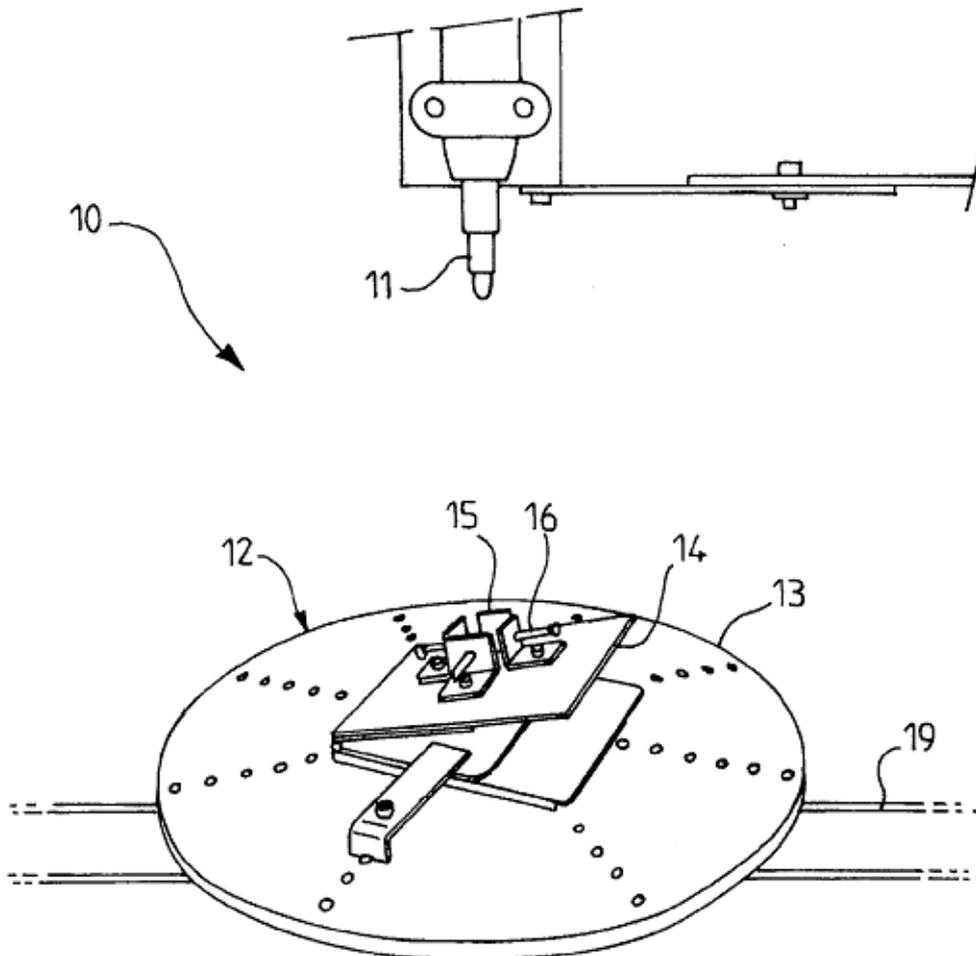


FIG. 2

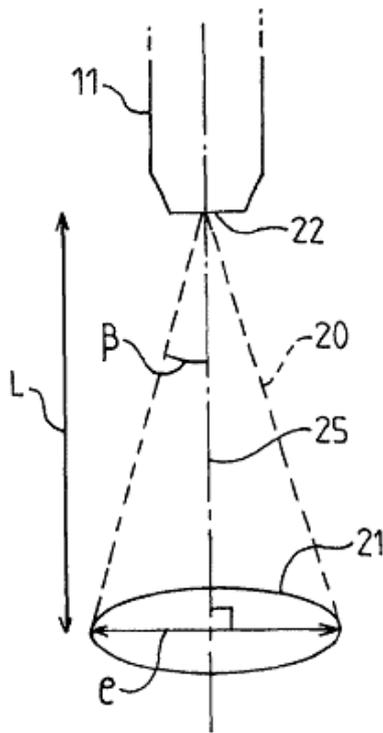


FIG. 3

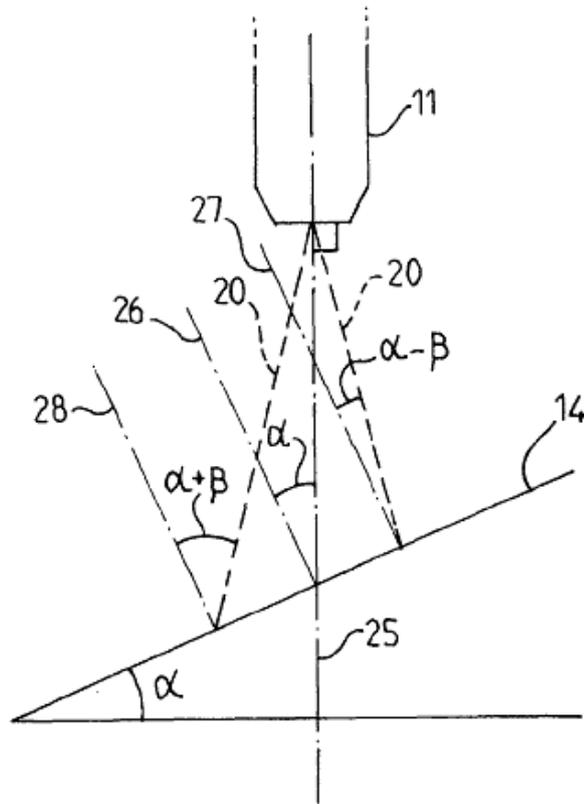


FIG. 4

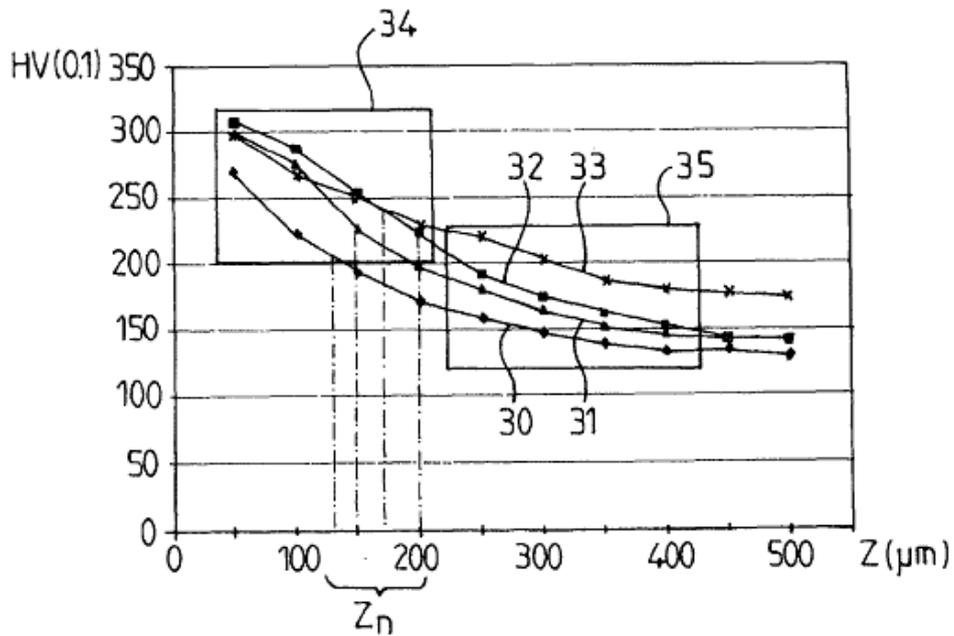


FIG. 5

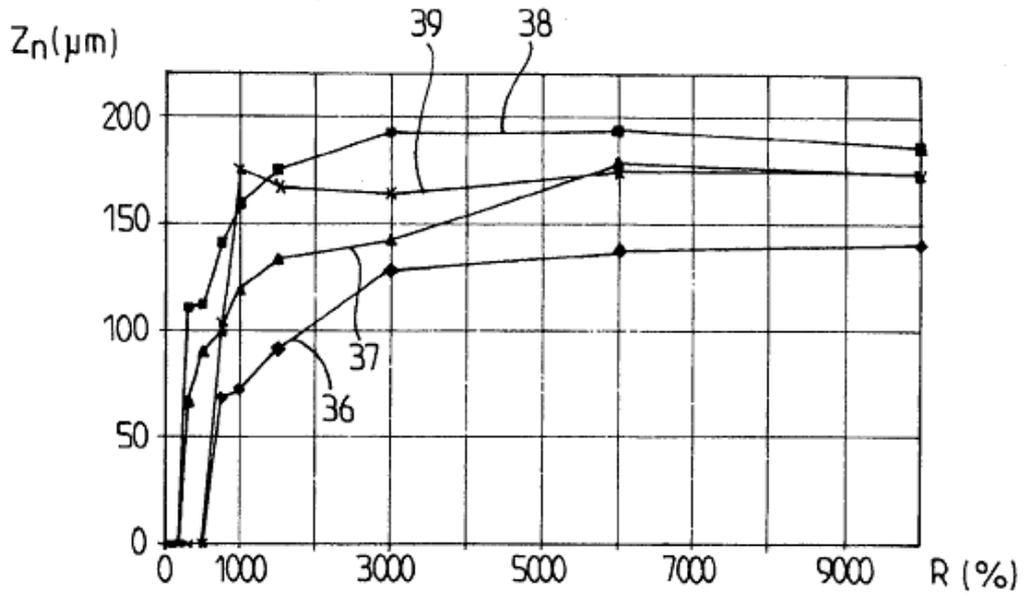


FIG.6

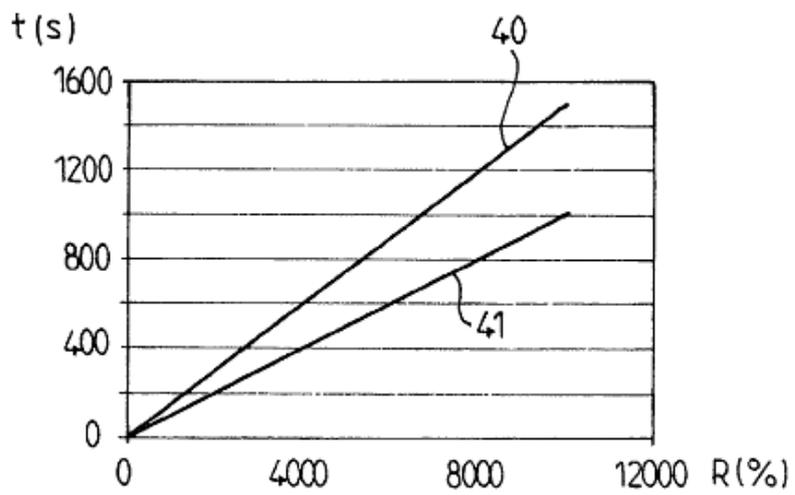


FIG.7

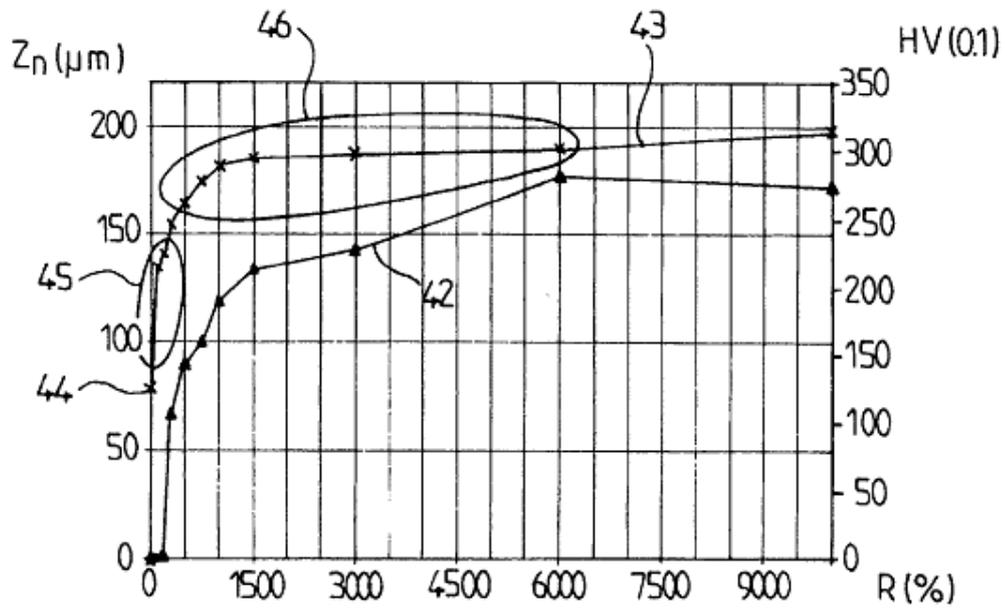


FIG.8

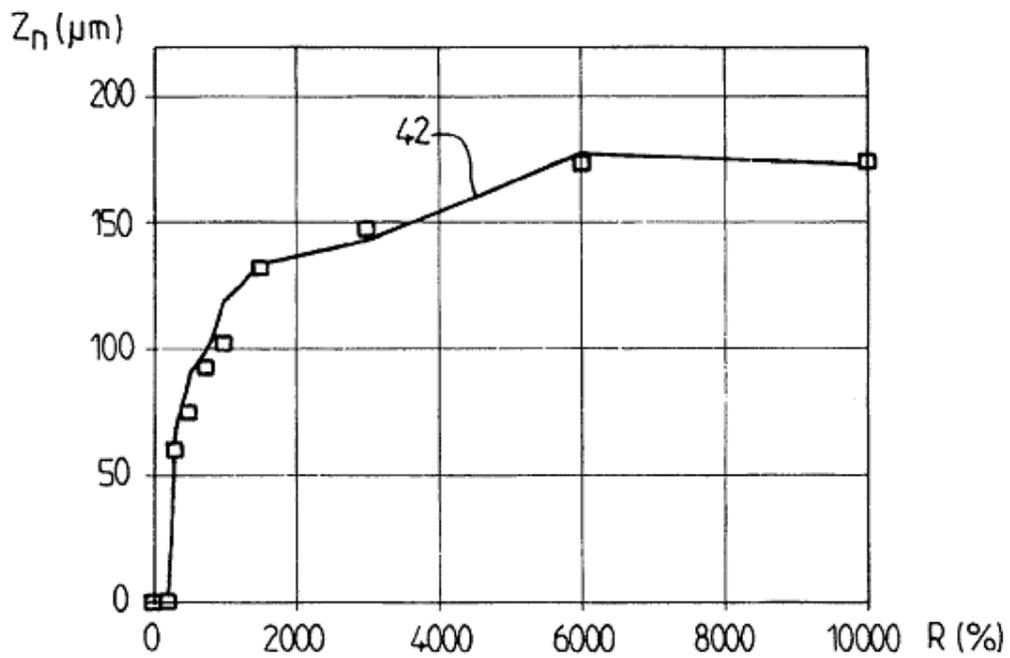


FIG.9

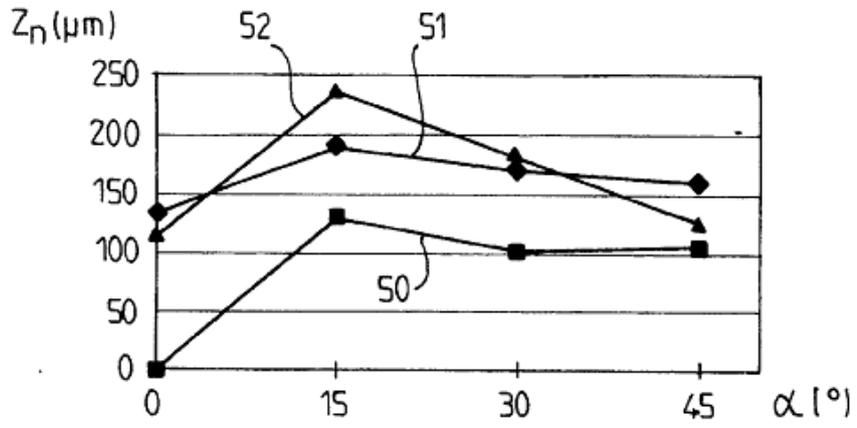


FIG.10

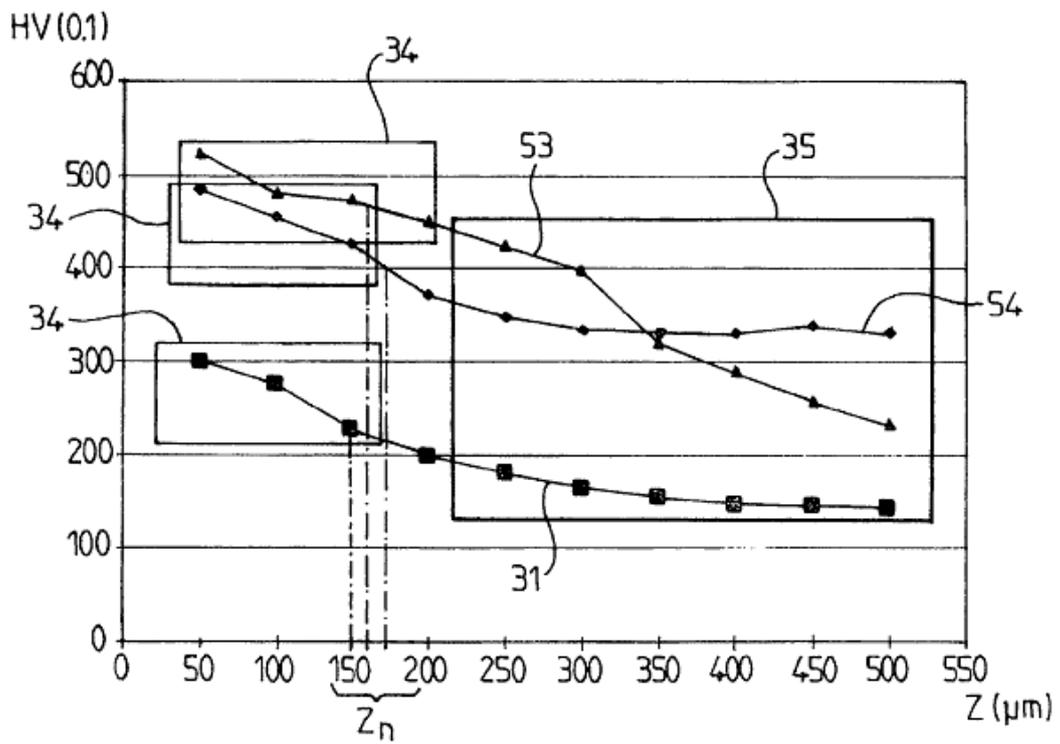


FIG.11

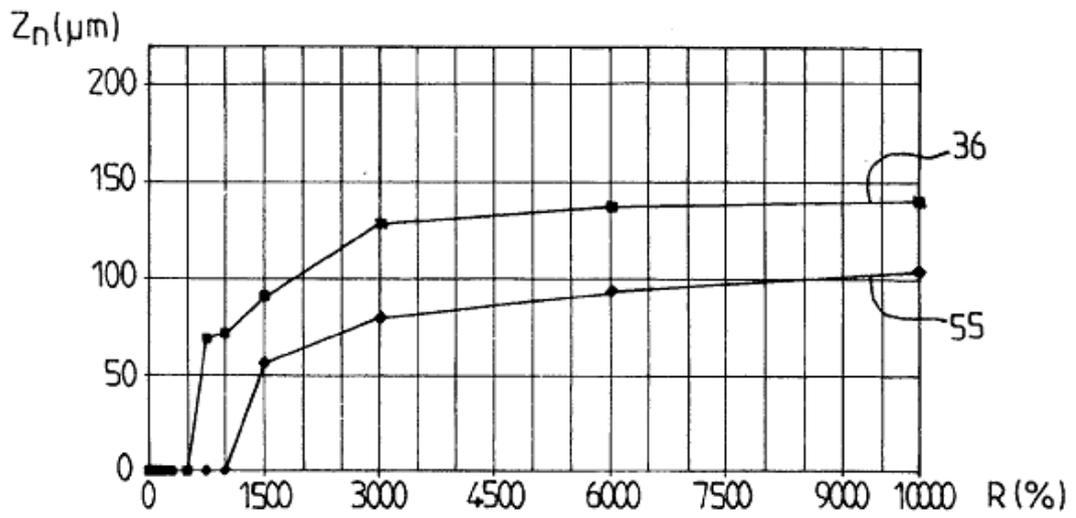


FIG.12

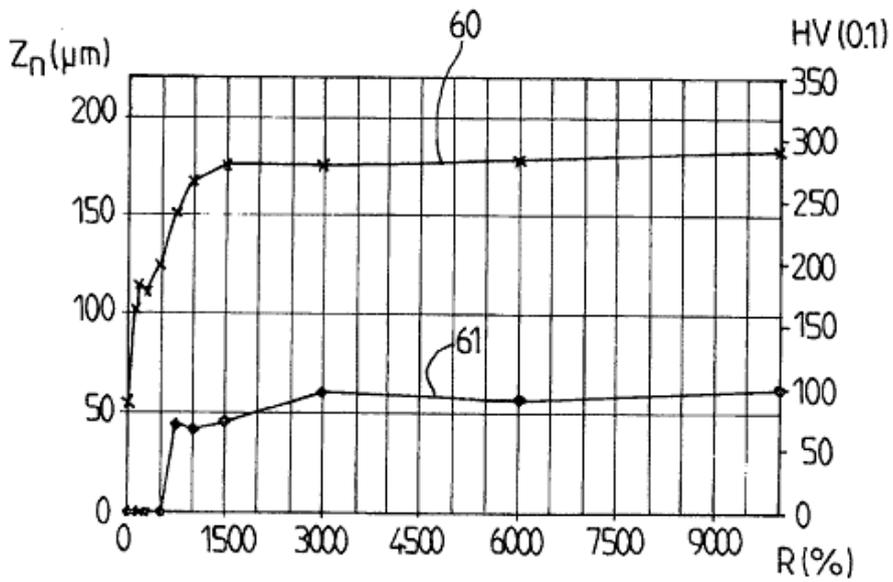


FIG.13

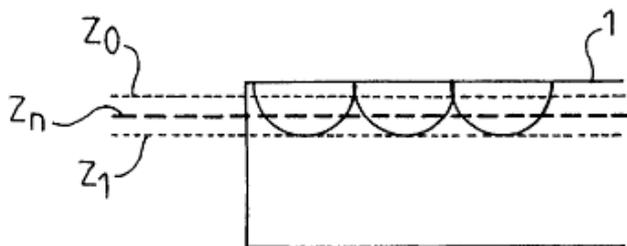
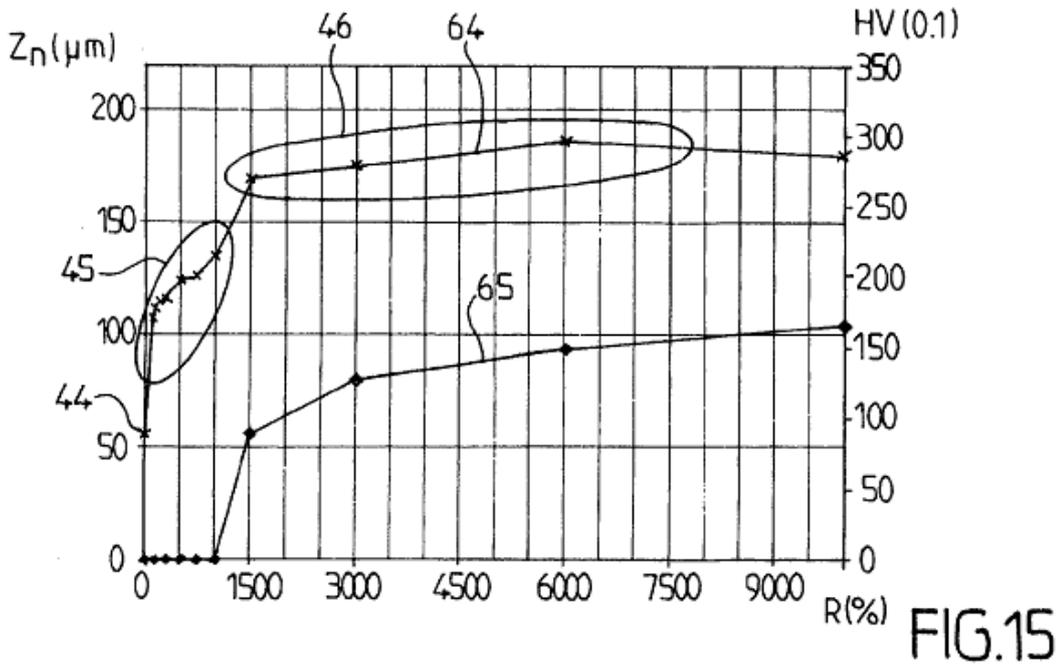
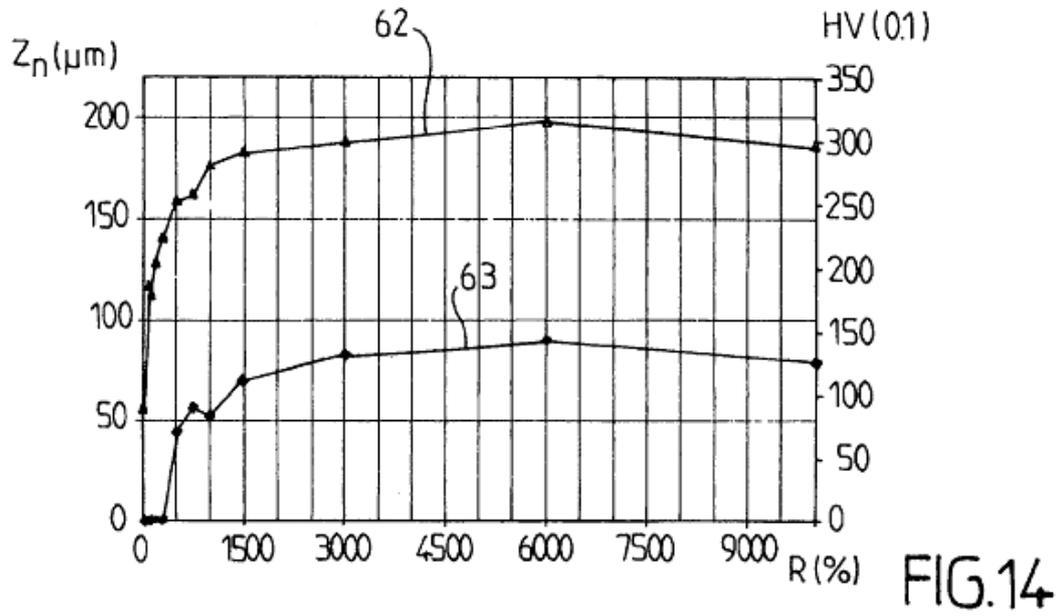


FIG.16

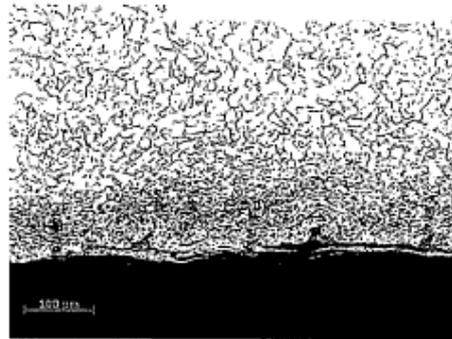
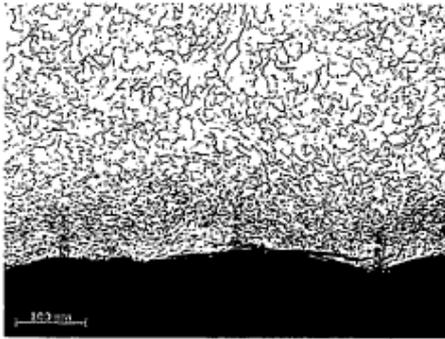


Fig. 17

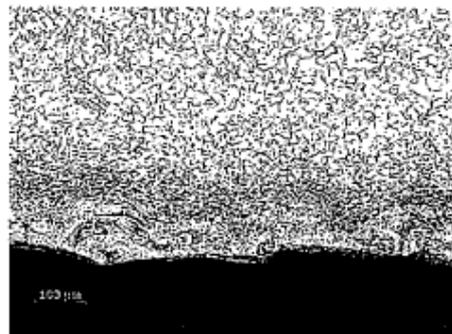
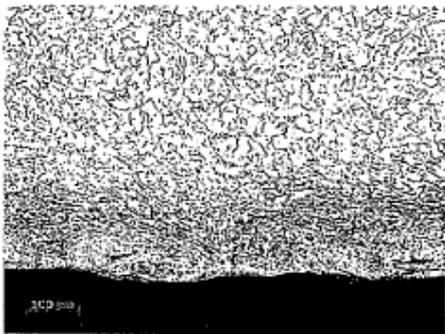


Fig. 18

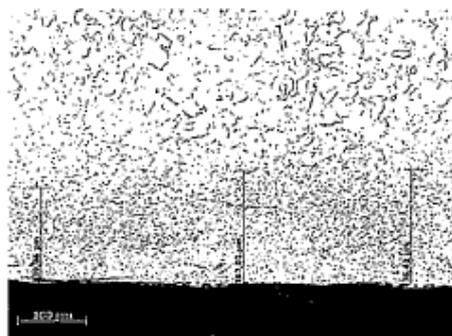
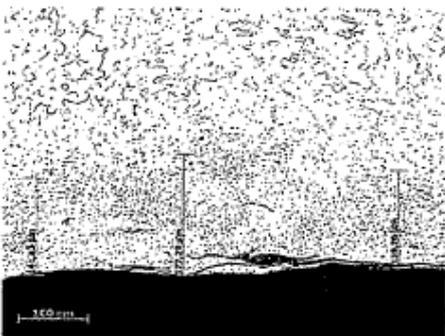


Fig. 19

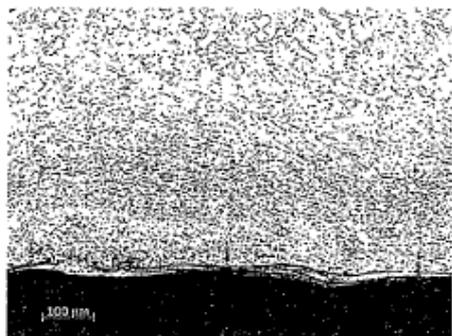
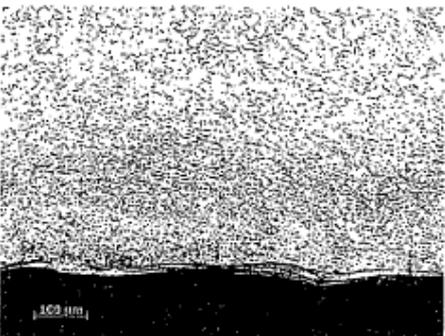


Fig. 20

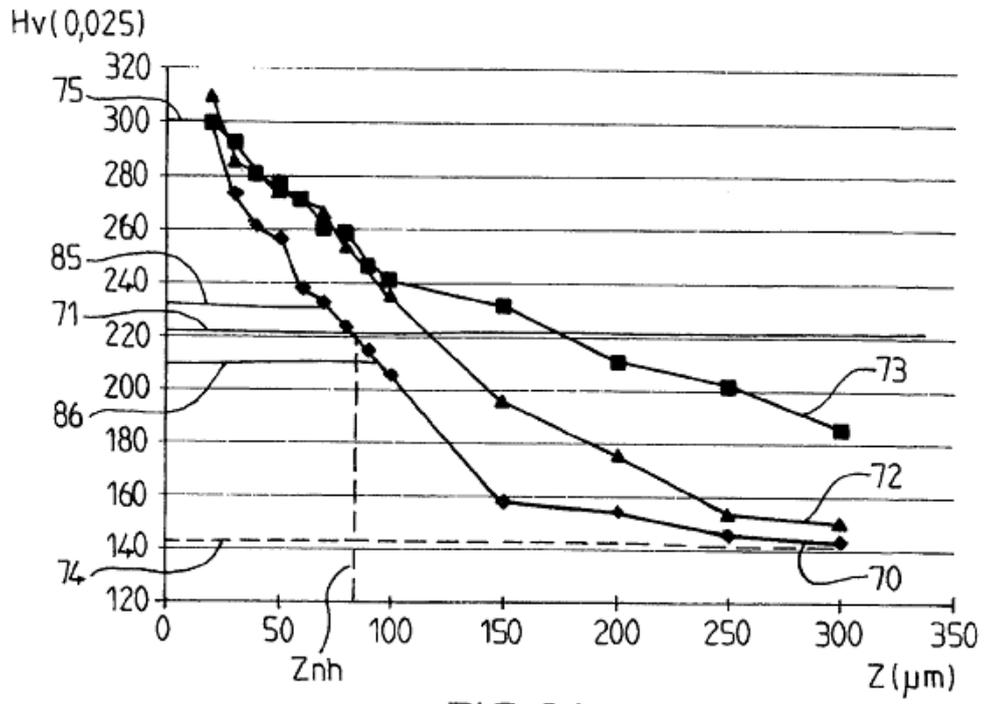


FIG. 21

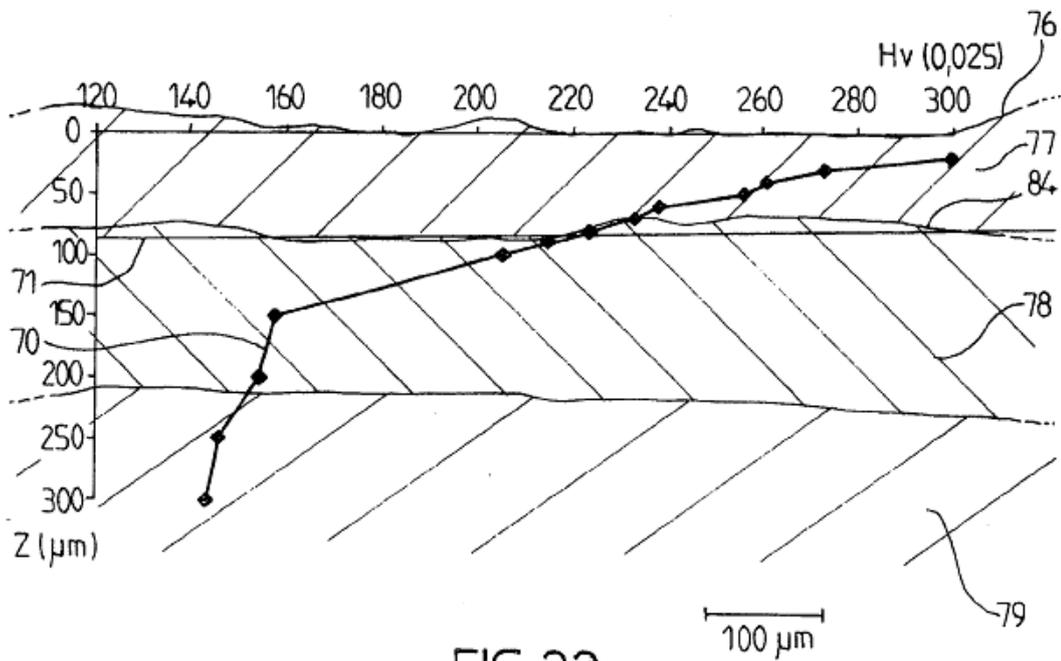


FIG. 22

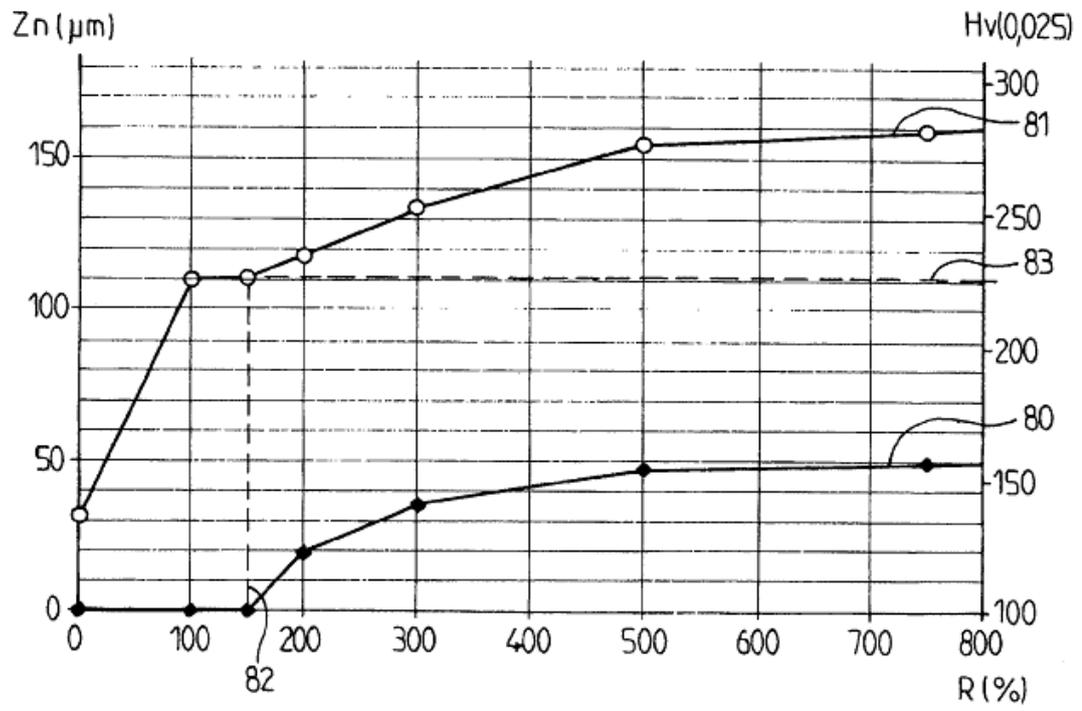


FIG.23