

COMPONENTE DE DESGASTE DE MATERIAL COMPUESTO

Campo de la invención

[0001] La presente invención se refiere a un componente de desgaste de material compuesto jerarquizado que tiene una resistencia mejorada a las tensiones combinadas de desgaste/impacto y que se obtiene mediante tecnología de fundición. El componente de desgaste comprende una red tridimensional de gránulos milimétricos agregados de material compuesto metal-cerámico con intersticios milimétricos que se caracteriza porque las partículas micrométricas basadas en TiC están incrustadas en un aglutinante, denominado "la primera matriz metálica", rellenándose los intersticios milimétricos durante la fundición del componente de desgaste con el metal fundido, denominado "la segunda matriz metálica" en la presente invención, comprendiendo los intersticios rellenos además partículas micrométricas de carburo formadas in situ a través de polvos metálicos formadores de carburo combinados con una fuente de carbono, procedente de un pegamento orgánico o del propio metal fundido.

Estado de la técnica y problema a resolver

[0002] La presente invención se refiere a componentes de desgaste empleados en la industria de molienda y trituración, como fábricas de cemento, canteras y minas. Estos componentes están con frecuencia sometidos a altas tensiones mecánicas en la masa y a un alto desgaste por abrasión en la superficie de trabajo. Por lo tanto, es deseable que estos componentes presenten una alta resistencia a la abrasión y cierta ductilidad para poder soportar tensiones mecánicas tales como impactos.

[0003] Dado que estas dos propiedades son difíciles de igualar con la misma composición de material, se ha propuesto en el pasado componentes de material compuesto con un núcleo de aleación relativamente dúctil en el que se incrustan insertos cerámicos de buena resistencia al desgaste.

[0004] El documento US 4,119,459 (Sandvik, 1977) describe un cuerpo de desgaste compuesto de hierro fundido y gránulos triturados de carburo cementado sinterizado. El carburo cementado, en un metal aglutinante, es de tipo WC-Co con posibles adiciones de carburos de Ti, Ta, Nb u otros metales. No se indica el porcentaje en volumen de TiC posible en los gránulos o en la parte reforzada del cuerpo.

[0005] El documento US 4,626,464 (Krupp, 1984) describe un batidor que se instala en un martillo que comprende un material básico de aleación metálica y una zona resistente al desgaste que contiene partículas de metal duro además de una

ferroaleación, teniendo las partículas de metal duro un diámetro de 0.1 a 20 mm y estando el porcentaje de las partículas de metal duro en la zona resistente al desgaste comprendido entre 25 y 95 por ciento en volumen; y que se caracteriza porque dichas partículas duras están firmemente incrustadas dentro de dicho material básico de aleación metálica. No se describe en este documento la concentración media en volumen de TiC posible en la parte reforzada.

[0006] El documento US 5,066,546 (Kennametal, 1989) describe un cuerpo resistente al desgaste jerarquizado que comprende al menos una capa de una serie de materiales de carburo, entre los cuales el carburo de titanio es incrustado en una matriz de acero fundido. El material de carburo tiene un tamaño de partícula de entre 4.7 y 9.5 mm que se caracteriza porque dicho material de carburo está en forma de partes trituradas, polvo o cuerpos prensados que tienen una forma irregular. Este documento no describe la concentración media de TiC en la parte reforzada del cuerpo de desgaste ni la constitución de la estructura de refuerzo.

[0007] El documento US 8,999,518 B2 (Magotteaux) describe un material compuesto jerarquizado que comprende una aleación ferrosa reforzada con carburo de titanio, según una geometría definida, en la que dicha parte reforzada comprende una macro-microestructura alternada de áreas milimétricas que están concentradas con partículas globulares micrométricas de carburo de titanio separadas por áreas milimétricas que están esencialmente libres de partículas globulares micrométricas de carburo de titanio, estando dichas áreas rellenas con una aleación ferrosa. En esta patente, la concentración máxima de TiC es de 72.2% en volumen cuando una mezcla en polvo de Ti y C se compacta a una densidad relativa máxima de 95%. La porosidad de los gránulos es superior a 5% en volumen y, en ausencia de un posible moderador de reacción, sólo una matriz metálica, el metal fundido, está presente. El material compuesto jerarquizado se obtiene mediante síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS), en la que se alcanzan temperaturas de reacción generalmente superiores a 1,500°C, o incluso 2,000°C. Sólo se necesita poca energía para iniciar localmente la reacción. Entonces, la reacción se propagará espontáneamente a la totalidad de la mezcla de los reactivos. El ejemplo 4 de este documento se utilizará en el presente documento como ejemplo comparativo de la presente invención.

[0008] El material compuesto jerarquizado de este documento se obtiene por la reacción en un molde de gránulos que comprenden una mezcla de polvos de carbono y titanio. Luego del inicio de la reacción, se desarrolla un frente de reacción que se propaga espontáneamente (autopropagación) y que permite obtener carburo de titanio a partir de titanio y carbono. Se dice que el carburo de titanio así obtenido se "obtiene

in situ" porque no procede de la aleación ferrosa fundida (la reacción $\text{SHS Ti}+\text{C} \rightarrow \text{TiC}$ es muy exotérmica con una temperatura adiabática teórica de 3290K). Esta reacción se inicia por el calor de fundición del hierro fundido o del acero utilizado para fundir toda la pieza.

[0009] Desafortunadamente, el aumento de temperatura de grandes cantidades de carbono y titanio provoca la desgasificación de los reactivos, es decir, de los volátiles contenidos en los mismos (H_2O en el carbono, H_2 , N_2 en el titano). Todas las impurezas contenidas en los polvos reactivos, componentes orgánicos o inorgánicos alrededor o dentro del polvo/granos compactados, se volatilizan. Para atenuar la intensidad de la reacción entre el carbono y el titanio, se añade polvo de una aleación ferrosa como moderador para absorber el calor y disminuir la temperatura. Sin embargo, esto también disminuye la concentración máxima de TiC que se puede obtener en la pieza de desgaste final y la concentración teórica de 72.2% antes mencionada no se puede alcanzar en la práctica a escala de producción.

[0010] El documento WO 2010/031663A1 se refiere a un impactador de material compuesto para trituradoras de percusión, donde dicho impactador comprende una ferroaleación que está reforzada al menos parcialmente con carburo de titanio en una forma definida según el mismo método que el documento US 8,999,518 B2 descrito anteriormente. Para atenuar la intensidad de la reacción entre el carbono y el titanio, se añade polvo de aleación ferrosa. En un ejemplo de este documento, las áreas reforzadas comprenden un porcentaje global en volumen de aproximadamente 30% de TiC. Con este fin, se obtiene una tira de 85% de densidad relativa por compactación. Después de la trituración de la tira, los gránulos obtenidos se tamizan para alcanzar una dimensión comprendida entre 1 y 5 mm, preferentemente entre 1.5 y 4 mm. Se obtiene una densidad de masa del orden de 2g/cm^3 (45% de espacio entre los gránulos + 15% de porosidad en los gránulos). Los gránulos de la pieza de desgaste que debe reforzarse comprenden así 55% en volumen de gránulos porosos. En dicho caso, la concentración de TiC en el área reforzada es sólo de 30%, lo que no siempre es suficiente y es probable que tenga un impacto negativo en el rendimiento de desgaste de la pieza fundida, en particular con granos de alta porosidad antes de la reacción SHS.

[0011] El documento US 2018/0369905A1 describe un método que proporciona un control más preciso del proceso de SHS durante la fundición mediante el uso de un moderador. Los insertos de fundición se fabrican a partir de una mezcla de polvo que comprende los reactivos de formación de TiC y un moderador que tiene la composición de acero fundido con alto contenido de manganeso que contiene 21% de Mn.

Objetivos de la invención

[0012] La presente invención tiene por objetivo proporcionar un componente de desgaste de material compuesto jerarquizado producido por fundición convencional que comprende una matriz metálica de hierro fundido o acero, integrando una estructura reforzada con una alta concentración de partículas micrométricas de carburo de titanio incrustadas en un aglomerante metálico, denominado en el presente documento primera matriz metálica, que forma gránulos de material compuesto metal-cerámicos de baja porosidad. La primera matriz metálica que incluye las partículas micrométricas de carburo de titanio de la parte reforzada es diferente de la matriz metálica presente en el resto del componente de desgaste de material compuesto. La estructura reforzada comprende también intersticios milimétricos, que se alternan periódicamente con los gránulos de material compuesto metal-cerámico, comprendiendo los intersticios milimétricos partículas micrométricas de carburo formadas in situ durante la operación de fundición e incrustadas en la segunda matriz metálica.

[0013] Un objetivo de la presente invención consiste en aumentar la concentración de carburo, incluso dentro de los intersticios rellenos por la segunda matriz metálica (el metal fundido).

[0014] Otro objetivo de la presente invención consiste en proporcionar un proceso seguro de fabricación de piezas de desgaste de material compuesto reforzado, evitando la liberación de gases, proporcionando un componente de desgaste de material compuesto mejorado, con una buena resistencia a los impactos y a la corrosión.

[0015] En la presente invención, la expresión "*intersticio*" debe entenderse como un espacio que separa al menos dos gránulos milimétricos agregados de material compuesto metal-cerámico. Durante la fundición, dichos intersticios se rellenan con el metal fundido, que está sustancialmente libre de partículas de compuesto metal-cerámico, pero que contiene al menos 3% de partículas de carburo dispersas formadas in situ por la presencia de metales formadores de carburo presentes alrededor de los gránulos milimétricos de compuesto metal-cerámico. Los gránulos milimétricos agregados de material compuesto que forman una red interconectada tridimensional están recubiertos o revestidos por un polvo de metales formadores de carburo que simplemente se adhiere al pegamento orgánico utilizado para aglomerar dichos gránulos. En un proceso alternativo, el aglomerado de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico se sumerge en una solución líquida o dispersión de partículas metálicas o sales para obtener una infiltración de dichos metales formadores de carburo en los intersticios de los gránulos milimétricos y su posterior secado.

[0016] En la presente invención, la expresión "*gránulos de material compuesto metal-cerámico*" debe entenderse como partículas granulares de unos pocos milímetros que comprenden principalmente partículas de material compuesto metal-cerámico, es decir, partículas cerámicas incrustadas en una primera matriz metálica, siendo dichas partículas posteriormente incrustadas en la segunda matriz metálica, la matriz metálica de fundición durante la operación de fundición.

[0017] Un espacio heterogéneo formado por partículas de diferentes tamaños y naturalezas no puede describirse de otro modo que mediante definiciones de espacios rellenos o no con las partículas en cuestión. Como se muestra en las Figuras 5 y 6, los granos se unen adhesivamente en una red tridimensional de material compuesto cerámico, preferentemente mediante un adhesivo orgánico, creando una pieza de desgaste reforzada con una estructura tridimensional con intersticios que se rellenarán durante la fundición.

Sumario de la invención

[0018] Un primer aspecto de la presente invención se refiere a un componente de desgaste de material compuesto jerarquizado que comprende una parte reforzada y una parte no reforzada, comprendiendo la parte reforzada una red interconectada tridimensionalmente de gránulos milimétricos agregados de material compuesto metal-cerámico alternados periódicamente con intersticios milimétricos, comprendiendo dichos gránulos de material compuesto metal-cerámico al menos 52% en volumen, preferentemente al menos 61% en volumen, más preferentemente al menos 70% en volumen de partículas micrométricas de carburo de titanio incrustadas en una primera matriz metálica, estando la red tridimensionalmente interconectada de gránulos de material compuesto metal-cerámico con sus intersticios milimétricos incrustada en una segunda matriz metálica, comprendiendo dicha parte reforzada en promedio al menos 23% en volumen, más preferentemente al menos 28% en volumen, aún más preferentemente al menos 30% en volumen de carburo de titanio, siendo la composición de la primera matriz metálica sustancialmente diferente de la composición de la segunda matriz metálica, comprendiendo la segunda matriz metálica la aleación ferrosa de fundición presente en los intersticios milimétricos de la parte reforzada, dichos intersticios milimétricos comprenden adicionalmente al menos 1% en volumen, preferentemente 3% en volumen de partículas micrométricas de carburo seleccionadas del grupo formado por carburo de wolframio, carburo de vanadio, carburo de molibdeno, carburo de titanio, carburo de niobio, carburo de hafnio y carburo de circonio o mezclas

de los mismos, determinándose el porcentaje de volumen de acuerdo con la norma ISO 13383-2:2012.

[0019] Según materializaciones físicas preferidas de la invención, el componente de desgaste de material compuesto se caracteriza además por una de las siguientes características o por una combinación adecuada de las mismas:

- los gránulos de material compuesto metal-cerámico tienen una densidad comprendida entre 4.8 g/cm^3 y 6 g/cm^3 , preferentemente entre 5 g/cm^3 y $5,6 \text{ g/cm}^3$, más preferentemente entre 5.2 g/cm^3 y 5.4 g/cm^3 , determinándose la densidad antes de la fundición de la segunda matriz metálica de acuerdo con la norma ISO 3369:2006;
- la porosidad de los gránulos de material compuesto metal-cerámico es inferior a 5% en volumen, preferentemente inferior a 3% en volumen, y más preferentemente inferior a 2% en volumen e incluso inferior a 0.5% en volumen;
- los gránulos de compuesto metal-cerámico incrustados tienen un tamaño medio de partícula d_{50} comprendido entre 0.5 y 10 mm, preferentemente entre 1 y 5 mm;
- las partículas de carburo de titanio incrustadas en la primera matriz metálica tienen un tamaño medio de partícula d_{50} comprendido entre 0.1 y 50 μm , preferentemente entre 1 y 20 μm ;
- las partículas micrométricas de carburo incrustadas seleccionadas del grupo formado por carburo de wolframio, carburo de vanadio, carburo de molibdeno, carburo de titanio, carburo de niobio, carburo de hafnio y carburo de circonio o mezclas de los mismos en la segunda matriz metálica tienen un tamaño medio de partícula d_{50} comprendido entre 0.1 y 50 μm , preferentemente entre 0.5 y 10 μm , determinándose el tamaño medio de partícula de las partículas de carburo incrustadas en la segunda matriz metálica mediante el método de intersección lineal de acuerdo con la norma ISO 4499-3:2016.
- la primera matriz metálica se selecciona del grupo formado por una aleación ferrosa, una aleación de base ferromanganeso, una aleación de base ferrocromo y una aleación de base níquel, siendo la composición de dichas ferroaleaciones diferente de la composición de las aleaciones ferrosas de fundición que representan la segunda matriz metálica;
- la segunda matriz metálica comprende una aleación ferrosa, en particular fundición blanca con alto contenido de cromo o acero.

[0020] La presente invención describe además un método para la fabricación de gránulos de material compuesto metal-cerámico que comprende las etapas de:

- moler composiciones de polvo que comprenden partículas de carburo de titanio, partículas de nitruro de titanio, partículas de carbonitruro de titanio, o mezclas de las mismas y partículas metálicas de la primera matriz metálica en presencia de un

disolvente que impide la oxidación, como alcohol o heptano, para alcanzar un tamaño medio de partícula d_{50} comprendido entre 1 y 20 μm , preferentemente entre 1 y 10 μm ;

- mezclar de 1 a 10%, preferentemente de 1 a 6%, de cera parafínica o lubricante sólido como estearatos de Ca/Zn con la composición en polvo;
- eliminar el disolvente por secado al vacío para obtener un polvo aglomerado;
- compactar el polvo aglomerado en tiras, láminas o varillas;
- triturar las tiras, láminas o varillas hasta obtener partículas de compuesto metal-cerámico hasta alcanzar un tamaño medio de partícula d_{50} comprendido entre 0.05 y 10 mm, preferentemente entre 0.1 y 5 mm;
- sinterizar los gránulos a alta temperatura en una atmósfera de vacío o argón.

[0021] La presente invención describe además un método para la fabricación de la red interconectada tridimensionalmente de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico alternados periódicamente con intersticios milimétricos, estando los gránulos recubiertos con polvo metálico formador de carburo, comprendiendo el método los siguientes pasos:

- mezclar los gránulos de material compuesto metal-cerámico obtenidos según la invención con aproximadamente 1 a 8% en peso, preferentemente 2 a 6% en peso, de pegamento orgánico;
- añadir de 5 a 20% en peso (en relación con el peso atómico del metal) de polvos metálicos formadores de carburo a los gránulos obtenidos en el paso anterior, seleccionándose los polvos metálicos formadores de carburo del grupo formado por wolframio, vanadio, molibdeno, titanio, niobio, hafnio y circonio o mezclas de los mismos, teniendo el polvo formador de carburo un tamaño medio de partícula d_{50} comprendido entre 10 y 500 μm .
- verter y compactar la mezcla en un primer molde;
- curar el pegamento orgánico;
- desmoldar la mezcla seca y obtener la red tridimensionalmente interconectada de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico alternados periódicamente con intersticios milimétricos, estando dichos gránulos recubiertos/revestidos con los metales antes mencionados capaces de formar carburos metálicos in situ para ser utilizados como refuerzo en la parte expuesta al desgaste del componente de desgaste jerarquizado.

[0022] La presente invención describe además un método para la fabricación de una pieza de desgaste de fundición de material compuesto jerárquico que comprende los siguientes pasos:

- colocar la red interconectada tridimensionalmente de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico recubiertos de polvo metálico formador de carburo, alternando periódicamente dichos gránulos con intersticios milimétricos, en la parte del volumen de un primer molde del componente de desgaste fundido de material compuesto jerarquizado que se va a reforzar;
- verter una segunda matriz metálica en el segundo molde e infiltrar simultáneamente los intersticios milimétricos de la red interconectada tridimensionalmente y formar carburos adicionales en los intersticios mediante una reacción in situ con los metales capaces de formar carburos;
- desmoldar el componente de desgaste de fundición de material compuesto jerarquizado.

[0023] La presente invención describe además un componente de desgaste fundido de material compuesto jerarquizado obtenido mediante el método de la invención.

Breve descripción de los dibujos

[0024] La figura 1 muestra el anillo de yunques de una fresadora en la que se realizaron las pruebas para la presente invención.

[0025] La figura 2 representa un yunque individual del anillo de yunques de la figura 1.

[0026] La figura 3 representa un yunque individual desgastado.

[0027] La figura 4 es una representación esquemática del posicionamiento de la estructura de refuerzo en la parte más expuesta al desgaste del yunque individual.

[0028] La figura 5 representa una vista global de la estructura de refuerzo definida como la red interconectada tridimensionalmente de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico alternados periódicamente con intersticios milimétricos, estando dichos gránulos recubiertos con partículas metálicas capaces de formar carburos metálicos in situ.

[0029] Las figuras 6 y 7 representan una vista ampliada de la estructura de refuerzo de la figura 5 que muestra la presencia de partículas metálicas formadoras de carburo en la superficie de los gránulos de TiC (Fig. 7 = imagen de microscopio óptico) y la Fig. 7a muestra en una imagen de SEM un agregado "limpio" de granos de material compuesto metal-cerámico sin partículas metálicas formadoras de carburo en la superficie. En cambio, la Fig. 7b muestra en una imagen de SEM granos de material compuesto metal-cerámico recubiertos con partículas metálicas formadoras de carburo en la superficie.

[0030] La figura 8 representa una vista detallada de sección del componente de desgaste fundido con la inclusión de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico con intersticios rellenos por la segunda matriz metálica (la matriz metálica fundida).

[0031] La figura 9 representa la interfaz entre los gránulos de material compuesto de TiC y la segunda matriz metálica que muestra partículas esféricas microscópicas de TiC (negras) incrustadas en la primera matriz metálica, relleno de los intersticios el aglutinante de las partículas de TiC y partículas esféricas microscópicas de NbC (blancas) incrustadas y formadas in situ en la segunda matriz metálica. La imagen muestra en gran aumento la interfaz entre los gránulos de TiC y la segunda matriz metálica representada en la figura 8.

[0032] La figura 10 es una representación esquemática del concepto de la presente invención basada en una diferencia de escala entre las partículas micrométricas de TiC incrustadas en una primera matriz metálica que forma gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico integrados en forma de una red tridimensional en la parte reforzada del componente de desgaste. Los carburos adicionales que se han formado in situ a partir de partículas metálicas formadoras de carburo están representados en los intersticios situados entre los gránulos milimétricos.

[0033] La figura 11 es una representación de una sección transversal de una muestra que comprende gránulos. Esta sección transversal se utiliza en el método para obtener el tamaño medio de las partículas de gránulos metal-cerámicos (como se explica más adelante).

[0034] La figura 12 es una representación esquemática del método para medir el diámetro de Feret (con diámetros de Feret mínimo y máximo). Estos diámetros de Feret se utilizan en el método para obtener el tamaño medio de las partículas de gránulos metal-cerámicos (como se explica más adelante).

Descripción de las materializaciones físicas preferidas de la invención

[0035] La presente invención se refiere a un componente de desgaste de material compuesto jerarquizado producido por fundición convencional. Consiste en una matriz metálica que comprende una estructura de refuerzo particular que comprende gránulos de material compuesto metal-cerámico densos (baja porosidad < 5%) e irregulares con un tamaño milimétrico medio de 0.5 a 10 mm, preferentemente de 0.8 a 6 mm, más preferentemente de 1 a 4 mm, incluso más preferentemente de 1 a 3 mm.

[0036] Se ha observado que el uso de polvos metálicos adicionales asociados a los gránulos metal-cerámicos permite un aumento suplementario de la concentración de

carburo a través de una fuente de carbono (pegamento orgánico) dentro de los intersticios una vez rellenados con el metal fundido.

[0037] El objetivo de la presente invención consiste en aumentar la concentración de carburo incluso dentro de los intersticios rellenados con el metal fundido (segunda matriz metálica). Incluso una pequeña cantidad de partículas de carburo micrométricas adicionales en los intersticios tiene una influencia positiva en la resistencia combinada al desgaste/impacto de la pieza de desgaste. Por lo tanto, el material compuesto jerarquizado según la presente invención comprende en su parte reforzada no sólo intersticios milimétricos alternados periódicamente con los gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico, sino también al menos 3% en volumen de partículas micrométricas de carburo, distintas del carburo de cromo presente de forma natural en la fundición blanca con alto contenido de cromo, situadas en los intersticios entre los gránulos milimétricos obtenidos mediante la presencia de polvos metálicos formadores de carburo (Ti, Nb, V, W, Mo, Zr,...) y una fuente de carbono procedente de la segunda matriz metálica o del pegamento orgánico utilizado para compactar los granos milimétricos de polvos metal-cerámicos.

[0038] Los materiales compuestos metal-cerámicos están formados por partículas cerámicas unidas por un aglutinante metálico, denominado en la presente invención primera matriz metálica. En la segunda matriz metálica (metal fundido) también se proporcionan partículas micrométricas de carburo adicionales, en los intersticios milimétricos entre los gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico.

[0039] Para aplicaciones de desgaste, la cerámica proporciona la alta resistencia al desgaste, mientras que el metal mejora, entre otras propiedades, la tenacidad. Los materiales compuestos metal-cerámicos de TiC comprenden partículas esferoidales micrométricas de carburo de titanio (52 a 95% en volumen de los gránulos, preferentemente 61 a 90% en volumen, más preferentemente 70 a 90% en volumen, tamaño de 0.1 a 50 μm , preferentemente de 0.5 a 20 μm , más preferentemente de 1 a 10 μm) unidas por una fase metálica (primera matriz metálica) que puede ser, por ejemplo, aleaciones de base Fe, Ni o Mo. Una aleación ferrosa, preferentemente fundición blanca de alto contenido en cromo o acero (segunda matriz metálica), se funde en el molde y se infiltra en los intersticios de dicha estructura de refuerzo.

[0040] En la presente invención, la expresión TiC, u otros carburos metálicos, no debe entenderse en un sentido químico estequiométrico estricto, sino como Carburo de Titanio en su estructura cristalográfica. El carburo de titanio posee un amplio rango de

composición con una estequiometría del C/Ti que varía entre 0.47 y 1, siendo preferible una estequiometría de C/Ti superior a 0.8.

[0041] El contenido volumétrico de gránulos de material compuesto metal-cerámico en el inserto que construye el volumen reforzado de la pieza de desgaste (excluyendo partes huecas o rebajes, si los hay) comprende normalmente entre 45 y 65% en volumen, preferentemente entre 50 y 60% en volumen, lo que conduce a concentraciones medias de TiC en el volumen reforzado comprendidas entre 23 y 62% en volumen, preferentemente entre 28 y 60% en volumen, más preferentemente entre 30 y 55% en volumen.

[0042] Los intersticios milimétricos que alternan periódicamente con los gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico comprenden al menos 3% en volumen, preferentemente al menos 5% en volumen, de partículas micrométricas de carburo seleccionadas del grupo formado por carburo de wolframio, carburo de vanadio, carburo de molibdeno, carburo de titanio, carburo de niobio, carburo de hafnio y carburo de circonio o mezclas de los mismos.

[0043] La parte reforzada jerárquica del componente de desgaste se produce a partir de una agregación de gránulos milimétricos irregulares de material compuesto metal-cerámico que tienen un tamaño medio comprendido aproximadamente entre 0.5 y 10 mm, preferentemente entre 0.8 y 6 mm, más preferentemente entre 1 y 4 mm, aún más preferentemente entre 1 y 3 mm (véanse las figuras 5, 6 y 7).

[0044] Los gránulos de material compuesto metal-cerámico recubiertos/revestidos con un polvo metálico formador de carburo son agregados generalmente en una forma tridimensional deseada con un adhesivo inorgánico conocido de sodio o potasio o vidrio de silicato, pero en la presente invención se prefieren los pegamentos orgánicos como el poliuretano o las resinas fenólicas como fuente adicional de carbono para los metales formadores de carburo. El agregado puede colocarse en un recipiente o detrás de una barrera. La forma deseada constituye una estructura abierta formada por una red interconectada tridimensionalmente de gránulos de material compuesto metal-cerámico aglomerados/agregados recubiertos de polvo metálico unidos por un aglutinante o mantenidos en su forma por un recipiente o barrera, donde el empaquetamiento de los gránulos deja intersticios milimétricos abiertos entre los gránulos, siendo los intersticios milimétricos rellenables por un metal fundido líquido (segunda matriz metálica). Este aglomerado se coloca o sitúa en un molde antes del vertido de la aleación ferrosa para formar la parte reforzada del componente de desgaste. Luego el metal líquido se vierte en el molde y el metal líquido rellena los intersticios abiertos entre los gránulos. Debe entenderse como intersticios milimétricos

los intersticios de 0.1 a 5 mm, preferentemente de 0.5 a 3 mm, dependiendo de la compactación de la estructura de refuerzo y del tamaño de los gránulos.

[0045] Los gránulos de material compuesto metal-cerámico suelen fabricarse de forma convencional, por pulvimetalurgia, conformando una mezcla de polvos cerámicos y metálicos de distribución de tamaños adecuada, seguida de una sinterización en fase líquida.

[0046] Normalmente, los polvos tienen un diámetro de 0.1 - 50 μm y comprenden TiC como componente principal y de 5 a 48 por ciento de un aglutinante metálico que puede ser un polvo constituyente individual o polvos ya aleados (primera matriz metálica). Los polvos se mezclan y/o trituran primero (dependiendo del tamaño inicial del polvo) en un molino de bolas, en seco o en húmedo (con alcohol o hexano, por ejemplo, para evitar la oxidación del polvo metálico). Pueden añadirse algunos coadyuvantes orgánicos con fines de dispersión o conformación. En caso de molienda húmeda, puede ser necesario un paso de secado. Esto puede hacerse, por ejemplo, mediante secado al vacío o secado por pulverización. La conformación se realiza normalmente mediante prensado isostático uniaxial en frío o moldeo por inyección o cualquier otro método de conformación para formar una tira, una varilla o una lámina.

[0047] Las tiras de chapa, por ejemplo, pueden triturarse hasta obtener granos y, posiblemente, tamizarse, hasta alcanzar un tamaño medio de partícula d_{50} comprendido entre 0.05 y 10 mm, preferentemente entre 0.1 y 5 mm. Puede ser una ventaja conseguir formas de gránulos irregulares sin una orientación fácil de extraer (gránulos muy bien retenidos mecánicamente en el metal fundido).

Los gránulos se sinterizan luego a una temperatura adecuada a bajo vacío o alto vacío, gas inerte, hidrógeno o combinaciones de los mismos. Durante la sinterización en fase líquida, se produce una reorganización de las partículas, impulsada por fuerzas de capilaridad. Los gránulos sinterizados se mezclan entonces con pegamento orgánico y con polvos metálicos formadores de carburo. Los polvos metálicos formadores de carburo se seleccionan del grupo formado por wolframio, vanadio, molibdeno, titanio, niobio, hafnio y circonio o mezclas de los mismos, teniendo el polvo formador de carburo un tamaño medio de partícula d_{50} entre 20 y 500 μm . La mezcla comprende de 1 a 20% en volumen, preferentemente de 5 a 15%, en volumen de polvos metálicos formadores de carburo, y de 80 a 99%, preferentemente de 85 a 95%, en volumen de gránulos de material compuesto metal-cerámico.

[0048] La aleación fundida (segunda matriz metálica) que incrusta los gránulos de material compuesto metal-cerámico del componente de desgaste es preferentemente una aleación ferrosa (fundición blanca de alto contenido de cromo,

acero, acero al manganeso...) o una aleación de níquel o molibdeno. Esta aleación puede elegirse para conseguir propiedades localmente optimizadas dependiendo de la tensión final de la pieza de desgaste (por ejemplo, el acero al manganeso proporcionará una alta resistencia al impacto, la fundición blanca con alto contenido en cromo proporcionará una mayor resistencia al desgaste, la aleación de níquel proporcionará una mayor resistencia al calor y a la corrosión, etc.).

El polvo metálico formador de carburo se elige para conseguir propiedades optimizadas localmente dependiendo de la tensión final de la pieza de desgaste. La elección del metal formador de carburo depende de varios criterios como, por ejemplo, una baja solubilidad (Zr, Hf) para cristales más grandes o disponibilidad y solubilidad media (Ti, W, Mo) y precio.

Ventajas

[0049] La presente invención permite obtener, dentro de una fundición convencional, una concentración de partículas de TiC que puede ser muy elevada en los gránulos de material compuesto metal-cerámico (52 a 95% en volumen), sin riesgo de defectos en el interior de la estructura de fundición (agujeros de gas, grietas, heterogeneidades...) ni de reacciones y proyecciones incontroladas y peligrosas en cuanto a la formación in situ de TiC en una reacción exotérmica autopropagada de grandes cantidades de materiales reactivos (SHS, véase más arriba). En la presente invención, se pueden alcanzar altas concentraciones medias de TiC en el volumen reforzado de la pieza de desgaste, gracias a la baja porosidad de los gránulos de material compuesto metal-cerámico. Dependiendo de la compactación/apilamiento de los gránulos de material compuesto metal-cerámico en el volumen reforzado, pueden alcanzarse valores de hasta aproximadamente 62% en volumen.

[0050] El uso de polvos metálicos adicionales asociados a los gránulos metal-cerámicos permite un aumento suplementario de la concentración de carburo dentro de los intersticios una vez rellenados por el metal fundido. La concentración de carburo dentro de los intersticios es complementaria a la alta concentración de TiC dentro de los gránulos de material compuesto metal-cerámico, pero no demasiado alta para mantener las propiedades de una estructura alternada dura y dúctil.

[0051] El componente de desgaste jerarquizado de la presente invención está sustancialmente libre de porosidad y grietas, lo que resulta en mejores propiedades mecánicas y de desgaste.

[0052] El tamaño de las partículas de carburo de titanio y de los gránulos de material compuesto metal-cerámico (TiC + aglutinante) de la presente invención puede

controlarse ampliamente durante el proceso de fabricación (elección de las materias primas, molienda, proceso de conformado y condiciones de sinterización). El uso de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico sinterizados a base de TiC, fabricados mediante la conocida pulvimetalurgia permite controlar el tamaño de grano y la porosidad, utilizar diversas composiciones de aleaciones metálicas como primera matriz metálica, altas concentraciones de TiC, dar forma fácilmente a los insertos sin gran necesidad de mano de obra, y una buena salud interna de los granos después del vertido incluso en condiciones de alto choque térmico.

Fabricación de los gránulos de material compuesto metal-cerámico:

[0053] La molienda y/o la mezcla del polvo inorgánico de TiC (52 a 95% en volumen, preferentemente 61 a 90% en volumen, más preferentemente 70 a 90% en volumen) y los polvos metálicos como primera matriz metálica (5 a 48% en volumen, preferentemente 10 a 39% en volumen, más preferentemente 10 a 30% en volumen) se realiza, como se ha mencionado anteriormente, en un molino de bolas con un líquido que puede ser agua o alcohol, dependiendo de la sensibilidad del aglutinante metálico a la oxidación. También pueden añadirse diversos aditivos (antioxidante, agentes dispersantes, aglutinante, plastificante, lubricante, cera para prensado...) con diversos fines.

[0054] Una vez alcanzado el tamaño medio de partícula deseado (normalmente inferior a 20 μm , preferentemente inferior a 10 μm , más preferentemente inferior a 5 μm), la suspensión se seca (mediante secado al vacío o secado por pulverización) para conseguir aglomerados de polvo que contengan los auxiliares orgánicos.

[0055] El polvo aglomerado se introduce en un aparato de granulación a través de una tolva. Esta máquina consta de dos rodillos sometidos a presión, a través de los cuales se hace pasar el polvo y se compacta. A la salida, se obtiene una tira continua (lámina) de material comprimido, que luego se tritura para obtener los gránulos de material compuesto metal-cerámico. A continuación, estos gránulos se tamizan hasta obtener el tamaño de grano deseado. Las fracciones granulométricas no deseadas se reciclan a voluntad. Los gránulos obtenidos tienen generalmente una densidad relativa de 40 a 70% (dependiendo del nivel de compactación, las características del polvo y la composición de la mezcla).

[0056] También es posible ajustar la distribución de tamaños de los gránulos, así como su forma, a una forma más o menos cúbica o plana, dependiendo del método de trituración (la trituración por impacto proporcionará gránulos más cúbicos, mientras que la trituración por compresión dará gránulos más planos). Los gránulos obtenidos tienen

globalmente un tamaño que proporcionará, después de la sinterización, gránulos de entre 0.5 y 10 mm, preferentemente de 0.8 a 6 mm, más preferentemente de 1 a 4 mm, aún más preferentemente de 1 a 3 mm. Los gránulos también pueden obtenerse por prensado clásico, uniaxial o granulación de la mezcla de polvos directamente como granos o en partes mucho más grandes que se triturarán posteriormente en gránulos, antes o después de la sinterización.

[0057] Finalmente, la sinterización en fase líquida puede realizarse en un horno a una temperatura de 1000-1600°C durante varios minutos u horas, en vacío, N₂, Ar, H₂ o mezclas, dependiendo de la fase metálica (tipo y cantidad de aglutinante) hasta que se alcance la porosidad deseada, preferentemente inferior a 5%, más preferentemente inferior a 3%, aún más preferentemente inferior a 2%.

[0058] Los gránulos sinterizados obtenidos se mezclan a continuación con pegamento orgánico y con polvos metálicos formadores de carburo. Los polvos metálicos formadores de carburo se seleccionan del grupo formado por wolframio, vanadio, molibdeno, titanio, niobio, hafnio y circonio o mezclas de los mismos, teniendo el polvo formador de carburo un tamaño medio de partícula d₅₀ comprendido entre 20 y 500 µm. La mezcla comprende de 3 a 20%, preferentemente de 5 a 15%, en volumen de polvos metálicos formadores de carburo, y de 80 a 97%, preferentemente de 85 a 95%, en volumen, de las partículas de material compuesto metal-cerámico obtenidas.

Realización de la estructura tridimensional de refuerzo (núcleo)

[0059] Como se ha mencionado anteriormente, los gránulos de material compuesto metal-cerámico recubiertos por polvo metálico formador de carburo se aglomeran bien mediante un adhesivo, bien confinándolos en un recipiente o por cualquier otro medio. La proporción del adhesivo no supera el 10% en peso en relación con el peso total de los gránulos y se sitúa preferentemente entre 2% y 7% en peso. Este adhesivo es preferentemente un adhesivo orgánico basado en una resina de poliuretano o fenólica.

[0060] Los gránulos de material compuesto metal-cerámico con baja porosidad se mezclan preferentemente con un adhesivo orgánico y el núcleo se endurece y puede desmoldarse. Dependiendo de la forma de los gránulos, de la distribución de tamaños, de la vibración durante el posicionamiento de los gránulos o del golpeteo del lecho de gránulos mientras se fabrica el núcleo, el núcleo comprende normalmente de 30 a 70% en volumen, preferentemente de 40 a 60 % en volumen, de gránulos densos, y de 70 a 30% en volumen, preferentemente de 60 a 40% en volumen, de vacíos (intersticios milimétricos) en una red 3D interconectada.

Fundición de la pieza de desgaste

[0061] El núcleo (estructura de refuerzo de la red interconectada tridimensional) se coloca y fija con tornillos o cualquier otro medio disponible en la porción de molde de la pieza de desgaste que se va a reforzar. A continuación, se vierte en el molde una aleación ferrosa líquida caliente, preferentemente hierro fundido blanco con alto contenido de cromo o acero.

[0062] De este modo, la aleación ferrosa líquida y caliente sólo rellena los intersticios milimétricos entre los gránulos del núcleo.

[0063] Debido a la cantidad limitada de polvo metálico que forma carburo metálico, no se produce una reacción SHS excesiva (reacción exotérmica o liberación de gas) durante el vertido, y el metal fundido se infiltrará en los intersticios (espacios milimétricos entre los gránulos) pero apenas se infiltrará en los gránulos de material compuesto metal-cerámico ya que no son porosos, pero los polvos metálicos formarán partículas micrométricas de carburo en los intersticios donde está presente la segunda matriz metálica hasta el enfriamiento completo de la pieza de desgaste.

Métodos de medición

[0064] Para la medición de la porosidad, del tamaño de los gránulos o de las partículas, se prepara una muestra para el examen metalográfico que esté libre de marcas de abrasión y pulido. Se debe tener cuidado de evitar arrancar partículas, lo que puede conducir a una evaluación engañosa de la porosidad. Las directrices para la preparación de la muestra pueden encontrarse en ISO 4499-1:2020 e ISO 4499-3:2016, 8.1 y 8.2.

Determinación de la porosidad:

[0065] La fracción volumétrica de porosidad de los gránulos libres puede calcularse a partir de la densidad medida y de la densidad teórica de los gránulos.

[0066] La fracción volumétrica de porosidad de los gránulos incrustados en la matriz metálica se mide de acuerdo con la norma ISO 13383-2:2012. Aunque esta norma se aplica específicamente a la cerámica fina, el método descrito para medir la fracción volumétrica de porosidad también puede aplicarse a otros materiales. Dado que las muestras aquí no son cerámicas finas puras, sino materiales compuestos de metales duros, la preparación de las muestras debe realizarse de acuerdo con las normas ISO 4499-1:2020 e ISO 4499-3:2016, 8.1 y 8.2. El grabado no es necesario para la medición

de la porosidad, pero puede realizarse de todos modos, ya que no cambiará el resultado de la medición.

Tamaño medio de las partículas de carburo de titanio:

[0067] El tamaño medio de las partículas de carburo de titanio incrustadas se calcula mediante el método de intersección lineal de acuerdo con la norma ISO 4499-3:2016. Se toman cinco imágenes de la microestructura de cinco gránulos diferentes con un microscopio óptico o electrónico a un aumento conocido, de manera que haya de 10 a 20 partículas de carburo de titanio en todo el campo de visión. Se trazan cuatro líneas de intersección lineal a través de cada imagen calibrada de manera que ninguna partícula individual sea atravesada más de una vez por una línea.

[0068] Cuando una línea intercepta una partícula de carburo de titanio, la longitud de la línea (l_i) se mide utilizando una regla calibrada (donde $i = 1, 2, 3, \dots, n$ para el 1er, 2o, 3er... enésimo grano). Las partículas incompletas que tocan los bordes de la imagen deben ignorarse. Deben contarse al menos 200 partículas.

[0069] El tamaño de partícula medio de intersección lineal se define como:

$$d_x = \frac{\sum l_i}{n}$$

Tamaño de partícula medio de gránulos metal-cerámicos:

[0070] Se realiza una panorámica fotomicrográfica combinando imágenes de forma que haya al menos 250 gránulos metal-cerámicos en todo el campo de visión de la sección transversal pulida de la muestra. El proceso de combinar una serie de imágenes digitales de diferentes partes de un objeto en una vista panorámica de todo el objeto que conserve una buena definición utilizando un programa informático y un microscopio óptico (por ejemplo, una panorámica de campo de imagen general obtenida mediante un Alicona Infinite Focus) forma parte del estado de la técnica. Una umbralización adecuada permite segmentar la imagen en escala de grises en rasgos de interés (los gránulos) y fondo (véase la figura 11). Si la umbralización no es consistente debido a una pobre calidad de imagen, se recurre a una etapa manual que consiste en dibujar a mano los gránulos, la barra de escala, si existe, y el borde de la imagen en un papel de calco, escaneando luego el papel de calco.

[0071] El diámetro de Feret, que es la distancia entre dos tangentes colocadas perpendicularmente a la dirección de medición, se mide en todas las direcciones para

cada gránulo mediante un software de análisis de imágenes (ImageJ, por ejemplo). En la figura 12 se muestra un ejemplo.

[0072] Se determina el diámetro de Feret mínimo y máximo de cada gránulo de la imagen. El diámetro de Feret mínimo es el diámetro de Feret más corto del conjunto de diámetros de Feret medidos. El diámetro de Feret máximo es el diámetro de Feret más largo del conjunto de diámetros de Feret medidos. Deben ignorarse los gránulos que tocan los bordes de la imagen. El valor medio de los diámetros de Feret mínimo y máximo de cada gránulo se toma como el diámetro equivalente x . Se calcula entonces la distribución del tamaño del volumen $q_3(x)$ de los gránulos a partir de las esferas del diámetro x .

Debe entenderse D_{50} de los gránulos como el tamaño medio ponderado por volumen $\bar{x}_{1,3}$ de acuerdo con ISO 9276-2:2014.

Tamaño de partícula medio de gránulos metal-cerámicos durante la fabricación de los gránulos:

[0073] El tamaño de los gránulos se mide mediante análisis de imagen dinámico de acuerdo con la norma ISO 13322-2:2006 con la ayuda de un Camsizer de Retsch. El diámetro de las partículas utilizado para la distribución del tamaño es $X_{c \min}$, que es la cuerda más corta medida en el conjunto de cuerdas máximas de una proyección de partículas (para un resultado próximo al cribado/tamizado).

[0074] Gránulo d_{50} es el tamaño medio ponderado por volumen de la distribución de volumen basada en $X_{c \min}$.

Medición del tamaño de las partículas del polvo durante la molienda:

[0075] El tamaño de partícula del polvo durante la molienda se mide por difracción láser con la teoría MIE según las directrices establecidas en ISO 13320:2020 por medio de un Mastersizer 2000 de Malvern. El índice de refracción para el TiC se fija en 3 y la absorción en 1. El oscurecimiento debe estar comprendido entre 10 y 15% y el residuo ponderado debe ser inferior a 1%.

Medición de la densidad de los gránulos sinterizados:

[0076] La determinación de la densidad de los gránulos sinterizados se realiza con agua de acuerdo con la norma ISO 3369:2006. Para los gránulos sin porosidad abierta, también se puede utilizar un picnómetro de desplazamiento de gas (como el AccuPyc II 1345 Pycnometer de Micromeritics), que da sustancialmente el mismo valor de densidad.

Determinación de la concentración adicional de carburo en los intersticios entre los gránulos

[0077] La concentración adicional de carburo en los intersticios se determina de acuerdo con la norma ISO 13383-2:2012. Este método especifica un método manual de realización de mediciones para la determinación de la fracción volumétrica en cerámicas finas utilizando micrografías de secciones pulidas y grabadas, superponiendo una cuadrícula cuadrada de líneas y contando el número de intersticios que yacen sobre cada fase cerámica.

Reducción a la práctica - pieza de desgaste del yunque

[0078] Las piezas de desgaste del yunque utilizadas en un impactador de eje vertical se han realizado de acuerdo con la invención. El volumen reforzado de las piezas de desgaste comprende diferentes porcentajes medios en volumen de TiC, desde aproximadamente 30 hasta 50% en volumen (Fig. 1 a Fig. 3).

[0079] Se compararon con una pieza de desgaste fabricada según el documento US 8,999,518 B2, ejemplo 4 de la invención (con un porcentaje de volumen global de TiC de aproximadamente 32 % en volumen en el volumen reforzado). La razón de esta comparación es que el ejemplo 4 es una composición típica "in situ" (Ti + C y moderador en una reacción autopropagada) que puede gestionarse con cuidado en las plantas, a pesar del hecho de que sigue creando llamas, gases y alguna proyección de metal líquido caliente durante el vertido.

[0080] Las piezas de desgaste del yunque de la invención también se compararon con una pieza de desgaste fabricada con diferentes refuerzos cerámicos pero con una matriz metálica idéntica.

[0081] Preparación de los gránulos de TiC de dos tipos diferentes:

El polvo de TiC de un tamaño inferior a 325 mallas (44 μm) se mezcla con uno o varios elementos individuales aleados o puros para alcanzar las composiciones del Cuadro 1. Se muele a continuación el polvo en un molino de bolas con auxiliares tecnológicos que evitan la oxidación de los metales, como alcoholes, durante 24 horas hasta alcanzar un tamaño medio de partícula de 3 μm .

	Gránulo tipo 1	Gránulo tipo 2
% en peso	Aglomerante de fundición blanca con	Aglutinante de acero al manganeso

	alto contenido en cromo	
TiC	80	80
C	0,7	
Mn	0,2	2,8
Cr	5,0	
Ni	0,0	1,1
Mo	0,3	
Si	0,1	
Fe	13,7	16,1
densidad de aleación	7,5	7,87
% en volumen de TiC	86%	86%

Cuadro 1

[0082] El disolvente antioxidante se elimina mediante un secador por vacío con cuchillas giratorias y luego se añade aproximadamente un 2% en peso de parafina y se mezcla con la mezcla de polvos. A continuación, el polvo aglomerado obtenido se tamiza a través de un tamiz de 100 µm. Se hacen tiras de 70% de la densidad teórica de las mezclas de polvo inorgánico/metálico mediante compactación entre los rodillos giratorios de un granulador compactador de rodillos con una presión de aproximadamente 200 bares. Se trituran las tiras entonces hasta obtener gránulos irregulares haciéndolas pasar por un tamiz con el tamaño de malla adecuado. Después de la trituration, los gránulos se tamizan para obtener una dimensión comprendida entre 1.4 y 4 mm. Luego estos gránulos irregulares porosos se sinterizan a alta temperatura, entre aproximadamente 1300°C y 1500°C, durante 2 horas en un horno de vacío con una presión parcial de argón de aproximadamente 20 mbar, hasta alcanzar una porosidad mínima (< 0.5% en volumen).

[0083] Los gránulos sinterizados tipo 2 con baja porosidad se mezclan a continuación con aproximadamente 2% en peso de un pegamento orgánico de poliuretano bicomponente.

Luego se añaden polvos metálicos del elemento formador de carburo a la mezcla que contiene gránulos del tipo 2, polvo de niobio de un tamaño inferior a 325 mallas para el ejemplo 1, y polvo de circonio de un tamaño inferior a 325 mallas para el ejemplo 2. Las finas partículas de polvo metálico se adhieren al poliuretano en la superficie de los gránulos milimétricos y forman un revestimiento en la superficie.

[0084] Las mezclas se vierten en un molde de silicona (se pueden aplicar vibraciones para facilitar el empaquetamiento y asegurarse de que todos los gránulos

están correctamente empaquetados) de la forma deseada de 100x30x150 mm. Después de un secado a 100°C durante varias horas en una estufa o un endurecimiento gaseoso con un gas con aminas para el aglutinante de poliuretano, los núcleos están suficientemente duros y pueden desmoldarse.

[0085] Esta red interconectada de gránulos recubiertos de metal, como se representa en las figuras 5 y 6, comprende aproximadamente 55% en volumen de gránulos densos recubiertos de polvo fino (45% en volumen de vacíos/intersticios milimétricos entre los gránulos recubiertos). Cada núcleo/estructura tridimensional de refuerzo se coloca en los moldes en la porción de las piezas de desgaste a reforzar (como se representa en la figura 4). A continuación, se vierte en los moldes fundición blanca con alto contenido en cromo o acero al carbono líquido y caliente de las composiciones indicadas en el Cuadro 2.

	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	Cu	Fe	Metal vertido
% en peso	3,3	1,2	25	0	1,5	0,5	0	balance	Fundición blanca con alto contenido en cromo
% en peso	0,4	0,9	3,1	1,1	0,6	0,8	0,6	balance	Acero al carbono

Cuadro 2

Durante el proceso de fundición, el metal líquido caliente llena todos los intersticios milimétricos entre los gránulos de la red interconectada, representando dichos intersticios 45 % del volumen total de la porción reforzada. Durante la fundición, el pegamento de poliuretano se carboniza y el aditivo metálico en polvo reacciona con el carbono de la masa fundida y/o del poliuretano carbonizado, como fuente de carbono, para formar partículas de carburo adicionales. Después del vertido, en la porción reforzada, se forma un compuesto por 55% en volumen con una alta concentración de aproximadamente 86% en volumen de partículas de carburo de titanio unidas por la primera matriz metálica y 45% en volumen de una segunda matriz metálica con una concentración media adicional de aproximadamente 8% en volumen de partículas de carburo adicionales de niobio o circonio (véase el Cuadro 3 más adelante). El contenido volumétrico global de carburos, distintos del carburo de cromo naturalmente presente en el acero al cromo, obtenido en la macro-microestructura reforzada de la pieza de desgaste es entonces de aproximadamente 47% en volumen.

[0086] Ejemplos

En los ejemplos siguientes, la dimensión del área reforzada es de 150x100x30 mm, lo que da lugar a un volumen de 450 cm³. La parte reforzada tiene una proporción de relleno del 55% en volumen y el volumen de los gránulos metal-cerámicos representa, por tanto, 248 cm³.

A continuación, se describe la composición y las propiedades de la red interconectada tridimensionalmente de gránulos milimétricos de material compuesto metal-cerámico alternados periódicamente.

	ejemplo 1	ejemplo 2	Ejemplo compa. 1	Ejemplo compa. 2	Ejemplo Comparativo 3 (M1=M2)
Tipo de gránulo	Gránulo tipo 2	Gránulo tipo 2	Gránulo tipo 2	ejemplo 4 de US 518	Gránulo tipo 1
Densidad relativa de gránulos (%)	99,6%	99,6%	99,6%	85,0%	99,6%
Porosidad de gránulos (%)	0,4%	0,4%	0,4%	15,0%	0,4%
Densidad teórica de gránulos	5,33	5,33	5,33	4,25	5,29
Densidad de los gránulos (g/cm ³)	5,31	5,31	5,31	3,61	5,27
Cantidad de gránulos (g)	1314	1314	1314	894	1304
Cantidad de pegamento (g)	26	26	26		26
Polvo de Nb -325mallas (g)	106				
Polvo de Zr -325mallas (g)		92			
Contenido calculado de TiC en los gránulos (% en volumen)	86%	86%	86%	Ti+C (*)	86%
(*) Ti+C sin reaccionar					
Pieza de desgaste					
Contenido de TiC en los gránulos (% en volumen)	86%	86%	86%	57%	86%
Contenido de TiC en la porción reforzada (% en volumen)	47%	47%	47%	32%	47%
Carburo adicional en la segunda matriz metálica (aleación fundida) (% en volumen)	8%	8%			
Contenido adicional de carburo en la porción reforzada (% en volumen)	3%	3%	0%	0%	0%
Porosidad en la porción reforzada (% en volumen)	0,4%	0,4%	0,4%	3%	0,4%
Índice de Rendimiento	1,30	1,25	1,20	1,00	1,10

[0087] Evaluación de la concentración del carburo adicional en la segunda matriz metálica (% en volumen) mediante el cálculo para un volumen reforzado de 450 cm³

($V_{\text{reforzado}}$) y 1314 g de gránulos ($W_{\text{gránulos}}$). La densidad teórica de los gránulos es de 5.33 g/cm³, la porosidad es de 0.4% en volumen y el volumen global de gránulos es de 247 cm³ con un volumen intersticial de 202.5 cm³.

		Fórmula	Ejemplo 1	Ejemplo 2
Peso del metal formador de carburo (g)	W_{Me}		106	92
Metal formador de carburo			Niobium	Zirconium
M de metal formador de carburo (g/mol)	M_{Me}		92,9	91,2
M de carbono (g/mol)	M_{C}		12,0107	12,0107
M de carburo metálico (g/mol)	$M_{\text{Carburo me}}$		104,9	103,2
Peso de carburo metálico formado (g)	$W_{\text{Carburo me}}$	$W_{\text{Me}} \times M_{\text{Carburo me}} / M_{\text{Me}}$	119,7	104,1
Densidad de de carburo metálico (g.cm ⁻³)	$d_{\text{Carburo me}}$		7,8	6,7
Volumen de carburo metálico (cm ³)	$V_{\text{Carburo me}}$	$W_{\text{Carburo me}} / d_{\text{Carburo me}}$	15	15
carburo adicional % en volumen				
• En intersticios		$V_{\text{Carburo me}} / V_{\text{intersticios}}$	8%	8%
• En refuerzo		$V_{\text{Carburo me}} / V_{\text{reforzado}}$	3%	3%

Comparación con el estado de la técnica

[0088] Las piezas de desgaste según la invención se comparan con la pieza de desgaste obtenida como en el ejemplo 4 del documento US 8,999,518 B2 (véase el ejemplo comparativo 2 de la presente invención). Las piezas de desgaste del yunque de la invención también se comparan con una pieza de desgaste fabricada con gránulos metal-cerámicos, cuyo aglutinante es idéntico a la aleación fundida (véase el ejemplo comparativo 3).

El anillo del yunque de la fresadora en la que se realizaron estas pruebas se ilustra en la FIG. 1.

[0089] En esta máquina, el inventor colocó alternativamente un yunque que comprende un inserto (como se representa en las figuras 2 y 3) según la presente invención rodeado a ambos lados por un yunque reforzado según el estado de la técnica de los ejemplos comparativos 2 y 3 para evaluar el desgaste en las mismas condiciones exactas. El material a triturar se proyecta a alta velocidad sobre la superficie de trabajo de los yunques (en la figura 2 se representa un yunque individual antes del desgaste). Durante la trituración, la superficie de trabajo se desgasta. El yunque desgastado se representa en la figura 3.

Cálculo del índice de rendimiento

[0090] Para cada yunque, la pérdida de peso se mide pesando cada yunque antes y después de su uso.

pérdida de peso = (peso final - peso inicial) / peso inicial

Se define a continuación un índice de rendimiento, siendo la pérdida de peso de referencia la pérdida de peso media del yunque del ejemplo 4 del documento US 8,999,518 B2 (en el presente documento, el ejemplo comparativo 2) a cada lado del yunque de prueba.

PI = pérdida de peso del yunque de referencia / pérdida de peso del yunque de prueba

[0091] Un índice de rendimiento superior a 1 significa que el yunque de prueba está menos desgastado que el yunque de referencia, e inferior a 1 significa que el yunque de prueba está más desgastado que el yunque de referencia.

- El índice de rendimiento (PI) del yunque reforzado según el ejemplo comparativo 3 de esta invención (utilizando gránulos de material compuesto metal-cerámico que contienen 86% en volumen (80% en peso) de carburo de titanio ligado por una matriz metálica como aleación fundida) es: 1.10. El rendimiento superior al del ejemplo comparativo 2 (ejemplo 4 del documento US 8,999,518 B2) puede explicarse por la reducción de defectos tales como grietas y porosidad en la pieza y una concentración de volumen local y global de carburo de titanio mucho mayor en los gránulos y en la parte reforzada.
- El índice de rendimiento (PI) del yunque reforzado según el ejemplo comparativo 1 de esta invención (utilizando gránulos de material compuesto metal-cerámico que contienen 86 % en volumen (80% en peso) de carburo de titanio ligado por una matriz metálica diferente (acero) como aleación fundida) es: 1.20. El rendimiento superior al del ejemplo comparativo 3 puede explicarse por la mayor tenacidad de los gránulos debida a la matriz de acero resistente frente a la matriz de fundición blanca con alto contenido en cromo, más quebradiza.
- El índice de rendimiento (PI) del yunque reforzado según el ejemplo 1 de la presente invención (utilizando gránulos de material compuesto metal-cerámico que contiene 86 % en volumen (80% en peso) de carburo de titanio) y 8% en volumen de carburo adicional en la aleación fundida formada por el polvo metálico de niobio adicional en el inserto antes del vertido es: 1.30. El rendimiento superior al del ejemplo 2 puede explicarse porque los carburos de niobio presentes en la segunda matriz metálica son más eficaces que el carburo de circonio en estas condiciones particulares.

- El índice de rendimiento (PI) del yunque reforzado según el ejemplo 2 de la presente invención (utilizando gránulos de material compuesto metal-cerámico que contiene 86% en volumen (80% en peso) de carburo de titanio) y 8% en volumen de carburo adicional en la aleación fundida formada por el polvo metálico de circonio adicional en el inserto antes del vertido es: 1.25. El rendimiento superior al del ejemplo comparativo 1 puede explicarse por los carburos adicionales en la segunda matriz metálica.

Densidad del material compuesto relacionada con la densidad de los compuestos (carburo de titanio y aleaciones)

[0092] Los siguientes cuadros ilustran la densidad del material compuesto en función del % en volumen de TiC y del % en volumen de porosidad (para las aleaciones de base hierro).

	Densidad (g/cm ³)
Carburo de titanio	4.93
Fundición blanca con alto contenido en cromo	7.5
Aleación ferrosa	7.87

Densidad del compuesto con aleación ferrosa (g/cm ³)		Porosidad (% en volumen)			
		5%	3%	2%	0.10%
Contenido en carburo de titanio (% en volumen)	52%	6.02	6.15	6.21	6.33
	61%	5.77	5.89	5.96	6.07
	70%	5.52	5.64	5.70	5.81
	85%	5.10	5.21	5.26	5.37
	96%	4.80	4.90	4.95	5.04
	99%	4.71	4.81	4.86	4.95

Ventajas de la presente invención

La presente invención presenta las siguientes ventajas en comparación con el estado de la técnica:

- Mejor rendimiento frente al desgaste gracias a un % en volumen de TiC localmente superior en los gránulos (imposible de alcanzar en la práctica con las tecnologías SHS que utilizan grandes cantidades de reactivos como en el estado de la técnica).

- Mejor rendimiento frente al desgaste o mejores propiedades mecánicas de la pieza de desgaste adaptando el tamaño y el contenido volumétrico del carburo de titanio y el uso de un aglutinante de fase metálica (primera matriz metálica) como el acero al manganeso de altas propiedades mecánicas en los gránulos de material compuesto metal-cerámico de TiC combinado con la aleación fundida (segunda matriz metálica) como la fundición blanca de alto contenido en cromo para la pieza de desgaste, siendo la primera matriz metálica diferente de la segunda matriz metálica.
- Mejor rendimiento frente al desgaste o mejores propiedades mecánicas de la pieza de desgaste adaptando el tamaño y el contenido volumétrico del carburo adicional en la segunda matriz metálica.
- Mejor rendimiento frente al desgaste o mejores propiedades mecánicas de la pieza de desgaste debido a una menor porosidad y/o menores defectos de fisuración, ya que se genera poco o ningún gas durante el vertido.