

**Aleado mecánico como una vía de modificación
microestructural para aceros aplicados en reactores nucleares
de Cuarta Generación: una revisión.**

*Mechanical alloying as a microstructural modification pathway for
steels applied in fourth generation nuclear reactors: a review*

Joel Isaí Vázquez-Hernández¹, Sergio Enrique Flores-Villaseñor^{1*}, Dagoberto Vázquez-Obregón², Jorge Carlos Ríos-Hurtado¹

¹Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila. Carretera 57 Km. 5 Estancias de San Juan Bautista Monclova, Coahuila, México, C.P. 25718.

²Tecnológico Nacional de México, Campus Saltillo. Blvd. Venustiano Carranza, privada Tecnológico 2400, Saltillo, Coahuila, México, C.P. 25280.

Correspondencia para: Sergio Enrique Flores Villaseñor
Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Norte
Celular: 86 62 52 13 33
Correo electrónico: sergio.villasenor@uadec.edu.mx

Resumen

Dentro del mundo de los materiales, se encuentran aquellos que son diseñados para aplicarse en ambientes con altas temperaturas, específicamente en el sector energético, como son los aceros ODS (por sus siglas en inglés “*oxide dispersion strengthened*”). Estos aceros se obtienen mediante la metalurgia de polvos ya que, por esta vía, es posible conseguir la modificación microestructural de una aleación base por la acción de incluir otros elementos dentro de su matriz metálica, lo cual, por métodos convencionales no sería posible realizar. En los últimos años se ha generado un aumento en el interés de determinados sectores de investigación, por el estudio de los métodos por los cuales es posible lograr la elaboración de este tipo de aleaciones, con miras a aplicarse dentro del campo de la energía nuclear. Por esa razón, el presente trabajo se enfoca en presentar información acerca de una de las etapas dentro de la pulvimetalurgia: el aleado mecánico, desde su influencia en la dispersión de partículas óxidos metálicos, los parámetros de control de proceso, hasta los métodos de caracterización mediante los cuales es posible dar un valor paramétrico adecuado al producto resultante.

Palabras clave: metalurgia de polvos, aleado mecánico, aceros, ODS, parámetros.

Abstract

Within the world of materials, there are those that are designed to be applied in environments with high temperatures, specifically in the energy sector, such as ODS steels (oxide dispersion strengthened). These steels are obtained by powder metallurgy since, by this method, it is possible to achieve the microstructural modification of a base alloy by the action of including other elements within its metal matrix, which, by conventional methods, would not be possible to perform. In recent years there has been an increase in the interest of certain research sectors in the study of the methods by which it is possible to achieve the elaboration of this type of alloys, in order to be applied in the field of nuclear energy. For this reason, the present work focuses on presenting information about one of the stages within powder metallurgy: mechanical alloying, from the influence of metal oxide particle dispersion,

process control parameters, up to characterization methods by which it is possible to give an appropriate parametric value to the resulting product.

Key words: powder metallurgy, mechanical alloying, steels, ODS, parameters.

1. Introducción

Debido al aumento en la población a nivel mundial, se ha generado una creciente demanda de energía eléctrica. Este aumento en la demanda ha devenido en el desarrollo e innovación de los sistemas de obtención de energía, con el fin de satisfacer de manera cada vez más eficaz, las necesidades básicas de la población.

En la década de 1990, la aparición y desarrollo de nuevos métodos de obtención de energía, generó un rezago en el estudio y construcción de nuevos reactores nucleares que funcionan a base de vapor de agua a presión (Lou y Gandy, 2019), es por ello que en el 2001 se creó el Generation IV International Forum (GIF). Este foro tiene como objetivo promover el desarrollo de reactores vanguardistas, dando lugar a la creación de los reactores de “cuarta generación” (Generación IV), los cuales tienen como principales objetivos: el cumplimiento de los requerimientos de sustentabilidad, seguridad nuclear, generar gastos accesibles y resistencia a la proliferación, y seguridad física (Azpitarte, 2018).

Se llaman reactores de Generación IV ya que el diseño de los reactores nucleares se clasifica por "generaciones" (véase Figura 1). Actualmente, funcionan en todo el mundo tres generaciones de sistemas de energía nuclear, derivados de diseños desarrollados a partir de finales de la década de los 40' (Perpiñá, 2021).

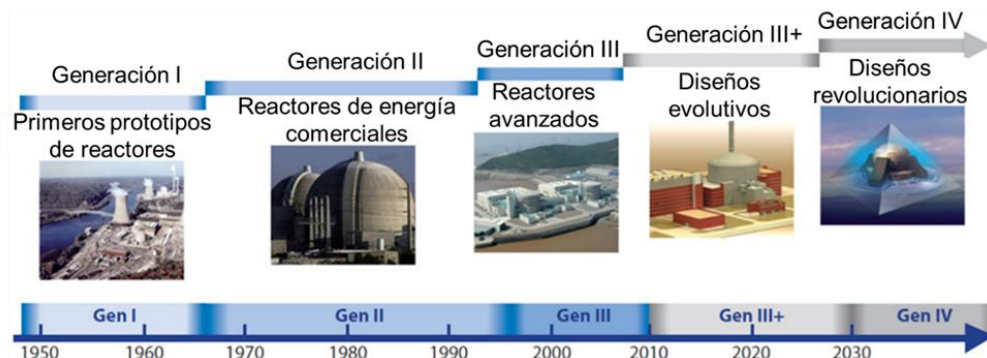


Figura 1. Evolución del diseño de reactores nucleares a lo largo de la historia. Adaptada de Nuclear Energy Agency (2014).

Plantear el desarrollo de los reactores nucleares avanzados Generación IV representa un gran desafío, principalmente cuando se habla de la selección de materiales estructurales necesarios para su construcción, debido a que sus operaciones implican la resistencia a altas temperaturas, grandes dosis de irradiación por neutrones y altas tensiones mecánicas (Lou y Gandy, 2019).

Hoy en día, la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales con las características necesarias para aplicarse en los nuevos reactores, implica un gran reto, debido a las condiciones a la que estos aceros serán sometidos durante su vida operacional (radiación neutrónica de 14 MeV) y temperaturas de hasta 700 °C. Las aleaciones reforzadas por dispersión de óxidos (ODS: “oxide dispersion strengthened”), son materiales candidatos con potencial a utilizarse en aplicaciones estructurales, ejemplo: en paredes de reactores de fusión nuclear avanzados y como revestimiento de combustible en algunos diseños de fisión Cuarta Generación (Šćepanović y col., 2018)

Los aceros ODS, se obtienen mediante la metalurgia de polvos; el factor clave para la implementación de esta técnica, es la posibilidad de formar materiales avanzados que no son posibles de obtener mediante procesos tecnológicos convencionales (Akhtar y col., 2018).

Como se observa en la Tabla 1, la construcción de nuevos reactores nucleares implica el desarrollo, estudio e innovación de nuevas tecnologías de manufactura. En la fabricación de estructuras, los aceros ODS forman una parte fundamental en la investigación de este campo

a futuro. Siendo la metalurgia de polvos (aleado mecánico seguido de un compactado y sinterizado), el principal método de obtención de los aceros ODS. Este método de fabricación le confiere a dicho acero, las características microestructurales necesarias para satisfacer las propiedades mecánicas requeridas.

Tabla 1. Tecnologías avanzadas de fabricación con fines en reactores nucleares bajo investigación. Adaptada de Lou y Gandy (2019).

Fabricación de estructuras	Tecnología de soldadura
Metalurgia de polvos – Prensado isostático en caliente	Soldadura por haz de electrones
Fabricación aditiva de materiales	Soldadura por fricción en estado sólido
Sinterización por chispa de plasma	Soldadura laser
Cualificación y control de proceso	Control de soldadura <i>in situ</i> y monitoreo en tiempo real
	Soldadura de material irradiado
Revestimientos avanzados	Construcción de reactores
Aerosol frío	Hormigón autocompactable y corrugado de
Revestimiento de láser de diodo	Alta resistencia
Fabricación aditiva de agitación por fricción	Construcción modular

Esta revisión se centrará en brindar información al lector a cerca de una de las tres etapas principales de la metalurgia de polvos: el aleado mecánico. Incluyendo conceptos generales, explicación de los fenómenos que actúan en los sistemas de aleado, parámetros principales y su influencia en el resultado final, así como una revisión sobre los trabajos de investigación en los que se emplea el aleado mecánico como método de fabricación y reforzamiento de aceros aplicados en el sector energético.

2. Aleado mecánico

En las últimas décadas dentro del campo de la metalurgia de polvos, el empleo de un molino de bolas como medio de tratamiento de un material ha evolucionado. Hoy en día, además de ser un método implementado para la preparación de un determinado material, también se

considera como un medio de obtención de materiales modificados con propiedades físicas y mecánicas mejoradas (Suryanarayana, 2019).

El aleado mecánico se define como un proceso cíclico en el cual se involucran repetidas soldaduras en frío – fractura – soldadura en frío de partículas de polvo dentro de un reactor (molino de bolas de alta energía). Este proceso consiste en la preparación y carga de polvos elementales individuales o prealeados junto con los medios de molienda en relaciones bola:polvo previamente determinadas (que comúnmente son 10:1). Posteriormente se realiza la “molienda” de polvos durante un periodo de tiempo establecido (Suryanarayana, 2022).

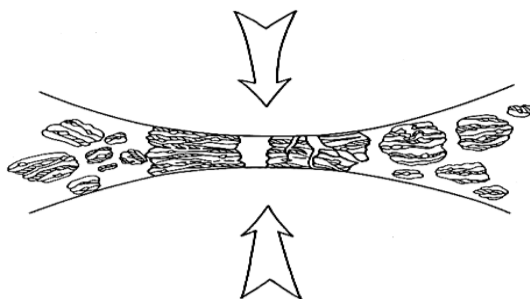


Figura 2. Representación gráfica de la interacción de las partículas de polvos con el medio de molienda. Adaptado de Suryanarayana (2001).

El aleado mecánico es un proceso fuera del equilibrio que desprende gran interés debido a que tiene el potencial de alear elementos inmiscibles. Como se observa en la Figura 2, durante este proceso, los medios de molienda colisionan con los polvos y el contenedor del molino, ocasionando que los polvos queden atrapados entre ellos, dando lugar a etapas de deformación, soldadura y fractura de los mismos debido a la energía provocada por los constantes impactos (Shuai y col., 2021).

El principio básico que rige el proceso de aleado mecánico es el siguiente:

1. Las partículas de los polvos metálicos dúctiles se deforman, cambiando su morfología (forma aplanada).

2. Las partículas con forma equiaxial son producidas por los mecanismos de soldadura (se observan líneas de soldadura orientadas).
3. Cuando se alcanza el equilibrio en los mecanismos de soldadura y fractura, se pueden producir partículas con líneas de soldadura orientadas de forma aleatoria.
4. El refinamiento de la microestructura involucrada continúa, pero la distribución del tamaño de las partículas se encuentra semi estable (proceso de estado estacionario) (Mucsi, 2019).

2.1 Mecanismos de aleado

El hecho de que cada uno de los mecanismos de fractura y soldadura que ocurren dentro del aleado mecánico ocurra en un tiempo adecuado, dependerá principalmente del comportamiento mecánico de los polvos. Por consiguiente, en base a las características mecánicas y físicas de los polvos, estos se clasifican como sistemas: 1) dúctil – dúctil, 2) dúctil – frágil y 3) frágil – frágil. En la Figura 3 se muestra de manera gráfica, la interacción entre los tres sistemas de componentes durante las etapas de aleado mecánico (Murty y Ranganathan, 1998).

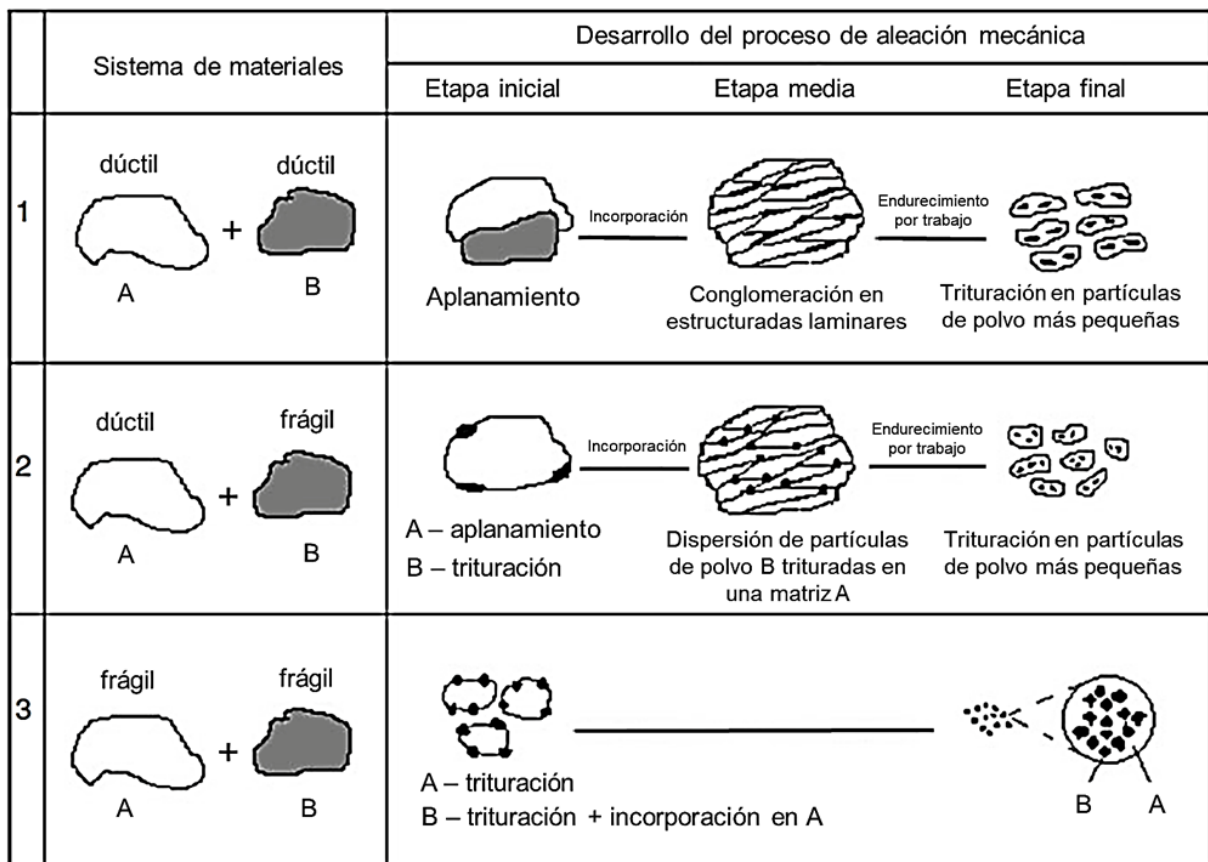


Figura 3. Características de deformación de los componentes representativos de los polvos de partida utilizados en la aleación mecánica. Adaptada de Ruys y col. (2015).

2.1.1 Sistema dúctil – dúctil

Durante las primeras etapas del aleado mecánico, los materiales dúctiles se comprimen para formar plaquetas mediante microforjado. A su vez, una pequeña cantidad del polvo se adhiere en las superficies del medio de molienda, formando un recubrimiento que impide el desgaste excesivo sobre las bolas, además de prevenir la contaminación de los polvos debido a dicho desgaste (Suryanarayana, 2001).

2.1.2 Sistema dúctil – frágil

Es en este sistema donde se presentan los aceros reforzados por dispersión de óxidos, mediante este sistema es posible explicar los mecanismos por los cuales las partículas de óxido se dispersan a través de una matriz dúctil. Al comienzo del aleado, las partículas

dúctiles se compactan por las colisiones bola-polvo-bola, mientras que los óxidos se fragmentan. Al final, las partículas de óxidos se ven obstruidas por los polvos de matriz dúctil, quedando atrapadas en estos últimos (Suryanarayana, 2001).

2.1.3 Sistema frágil – frágil

Durante el proceso de aleado mecánico los componentes frágiles se someten a una reducción constante de tamaño. Durante este proceso, se llega a un momento en el cual los tamaños de partícula son tan pequeños, que estas partículas de polvo se comportarán como un componente dúctil, impidiendo una mayor reducción del tamaño de partícula. En estos sistemas, se ha observado que el componente más duro (más frágil) se fragmenta y se incrusta en el componente más dúctil (menos frágil) (Suryanarayana, 2001).

2.2 Implicaciones del proceso de aleado mecánico

2.2.1 Ventajas

Desde hace aproximadamente 40 años, se han realizado diversas investigaciones con el fin de lograr la formación de distintas fases estables y metaestables, así también soluciones sólidas en equilibrio y sobresaturadas, además de obtener materiales con fases intermedias cristalinas y aleaciones amorfas. Los materiales con dimensiones del orden nanocristalino, (comúnmente < 100 nm) también se producen por aleado mecánico, a partir de mezclas de polvos (Suryanarayana e Ivanov, 2003).

2.2.2 Desventajas

Factores como el pequeño tamaño de las partículas de polvo, exposición a una gran área superficial y la formación adicional de esta (por acción de la molienda) fomentan la presencia de contaminación. Otra desventaja es la complejidad del proceso, debido a que el aleado mecánico es un proceso estocástico y el número de parámetros a tomar en cuenta, es muy variado (Suryanarayana y col., 2001).

3. Parámetros del proceso de aleado mecánico

Dentro del aleado mecánico, existen distintos parámetros cuyo control, toma un lugar clave en el proceso debido a que la adecuada magnificación de ellos dará lugar a características

específicas del aleado final. A continuación, se muestran las principales variables de proceso a considerar durante el aleado mecánico.

3.1 Materia prima

El tipo de materia prima empleada para el aleado mecánico son polvos puros con un amplio rango de tamaños disponibles ($1 \pm 200 \mu\text{m}$). Salvo alguna situación extrema, donde el tamaño del medio de molienda (bola) sea mayor que el tamaño de partícula del polvo a tratar, este último resulta no ser muy determinante, debido a que recién iniciado el proceso de molienda, las dimensiones de las partículas de polvo disminuyen exponencialmente hasta alcanzar el valor de unas pocas micras. La mayoría de los polvos empleados en este proceso se clasifican en las siguientes categorías: metales puros, aleaciones maestras, polvos prealeados y compuestos refractarios. Cuando se emplea el aleado mecánico como método de refuerzo de distintos materiales, los polvos suelen estar compuestos adicionalmente de carburos, nitruros y óxidos. Siendo los óxidos los más comunes (Suryanarayana, 2001).

3.2 Velocidad de molienda

La velocidad a la que se realiza la molienda está relacionada directamente con la cantidad de energía que se aplica a los polvos de trabajo. Cuando se emplean altas velocidades de molienda, se transfiere una mayor cantidad de energía cinética a los polvos, provocando en el material la presencia de defectos cristalinos como: dislocaciones, vacantes, fallas de apilamiento, además de aumentar el número de límites de grano (Daswa y col., 2018; Gheisari y col., 2009). En el material también ocurren deformaciones de red, debido a la presencia de una gran cantidad de límites de grano que se relacionan al aumento en la densidad de dislocaciones y deformación mecánica (Ahamed y Kumar, 2011). Cuando se alcanza cierto nivel en la densidad de dislocaciones en las regiones con altos niveles de deformación, ocurren un refinamiento de la partícula, fragmentándose en menores dimensiones (Rochman y col., 2003).

3.3 Relación de carga bola:polvo

La relación bola:polvo (en peso) es uno de los parámetros de mayor relevancia en el aleado mecánico debido al efecto que tiene en el tiempo necesario para lograr determinadas características del polvo, por ejemplo, cuando mayor es la relación bola:polvo menor es el tiempo necesario para el aleado, además de lograr una disminución en el tamaño de cristal, debido al aumento en la transferencia de energía de las bolas al polvo. Por otro lado, cuando se aumenta la cantidad de energía transferida, se tiene un aumento en la temperatura del sistema, lo cual podría favorecer un cambio en la constitución de los polvos (Muñiz, 2021).

Además, este parámetro se relaciona con el tiempo necesario para realizar el aleado, cuando se tiene una mayor relación, el tiempo requerido disminuye. Las relaciones más utilizadas se encuentran en 10:1, que se emplea comúnmente para molinos de menor capacidad (por ejemplo, un molino SPEX). En cambio, cuando la capacidad de los molinos aumenta, como en el caso de un triturador, las relaciones bola:polvo aumentan, pasando a ser de hasta 50:1 o incluso 100:1 (Rodriguez, 2021).

3.4 Equipo de molienda

La carga comprendida de polvos y bolas, se colocan en molinos de alta energía, adecuados para llevar a cabo el aleado mecánico. La capacidad, la velocidad de operación y su capacidad para controlarse, así como la capacidad de evitar la contaminación de los polvos, son las principales características que diferencian a un tipo de molino de otro.

Los molinos de bolas convencionales, molinos planetarios, molinos de atrición y molinos vibratorios, se emplean dentro de las investigaciones a nivel laboratorio para estudiar los fenómenos que ocurren en el proceso de aleado mecánico (Neikov, 2019).

En la Tabla 2, se muestra una comparación entre las características principales de los molinos utilizados más comunes, empleados para hacer aleado mecánico.

Tabla 2. Principales tipos de molinos y una descripción general. Elaboración propia, adaptada de Hernández (2017) y Pérez (2013).

Molino	Descripción
---------------	--------------------

Molino de bolas de atrición	Capacidad de procesar cantidades importantes de polvo (kilogramos) en tiempos moderados (horas). Las bolas y el polvo se colocan en un recipiente estacionario y se agitan por medio de un rotor con brazos. La potencia alcanzada en este tipo de molinos (modelo ZJM-100) puede llegar hasta los 7.5 KW (911Metallurgist, 2021).
Molino vibratorio	Puede procesar pequeñas cantidades de polvo (entre 10 y 20 g aproximadamente) en tiempos relativamente cortos (<1 hora). La carga de bolas y polvo se colocan en un vial que es agitado a alta frecuencia en las tres direcciones espaciales. Este molino permite alcanzar una potencia de vibración de 0.19 KW (Balzuweit, 2020).
Molino planetario	Está formado por una serie de contenedores colocados sobre una plataforma giratoria, en los cuales se coloca la carga de bolas y polvo. La base gira en un solo sentido y los contenedores en sentido contrario. Una desventaja de usar este tipo de molino es la dificultad para emplear atmósferas controladas. Para un molino planetario PM 300 Retsch, se puede alcanzar velocidades de 800 rpm con capacidades de 12 mL a 500 mL en volumen (Retsch, 2023).
Molino convencional horizontal de bolas	La carga de bolas y polvo se colocan en un tambor (diámetro >1 m), que gira alrededor de su eje horizontal. Se utiliza para procesar grandes cantidades de polvo por tiempo de procesado muy largo (del orden de días).
Molino Spex	Este molino cuenta con un vial que oscila en diferentes ejes a altas frecuencias. Permite cargas menores a 10 g, con 3 bolas en dirección perpendicular a velocidades de 1200 rpm. Este molino permite producir compuestos intermetálicos en cortos periodos de aleado (Lobov, 2023).

La correcta elección de un molino es determinante, y esta depende principalmente de los requerimientos del proceso (parámetros a controlar) y de las características

cualitativas/cuantitativas del material a obtener. Por ejemplo, para procesar grandes cantidades por tiempos prolongados, se propone emplear un molino convencional horizontal de bolas (tiempo en orden de días) o un molino horizontal de atrición (cantidades en kg y tiempo en horas), por el contrario, si se desean trabajar pequeñas cantidades de material, un molino Spex será el adecuado (capacidades de carga <10 gr), además de que por este molino se obtienen tiempos de proceso cortos en comparación a los demás, debido a las altas velocidades de aleado que se pueden alcanzar.

3.5 Tiempo de molienda

Se ha observado que conforme aumenta el tiempo de molienda, el tamaño de partícula disminuye (Singh y col., 2018). Este fenómeno se debe al mecanismo de soldadura en frío de las partículas dúctiles en etapas iniciales que, al aumentar los tiempos de molienda, terminan en la fractura de las partículas de polvo (Hassan y col., 2014). Es decir, en las primeras etapas de la molienda, las partículas dúctiles se aplanan, para después soldarse en frío. Al seguir con el proceso de molienda, se favorece el endurecimiento por trabajo de los polvos, ocasionando tiempo después, la fractura de estos. Esto a su vez, se traduce en la disminución del tamaño de partícula de los polvos (Khakbiz y Akhlaghi, 2008).

Al tener un tamaño de partícula menor, se aumenta la relación superficie-volumen, esto produce una gran cantidad de defectos en la red, como dislocaciones y límites de grano. Otro punto es que, al aumentar el tiempo de molienda, el constante impacto de las bolas con la pared interior del vial puede producir desgaste del medio de molienda, propiciando a la contaminación del polvo, así como cambios en la composición química. Además, si no se realiza una correcta optimización del proceso de aleado, el gasto energético durante largos tiempos de proceso produce un aumento en los costos de producción (Hajalilou y col., 2017).

3.6 Atmósfera protectora

Comúnmente, el proceso de aleado mecánico se realiza al vacío o en presencia de una atmósfera inerte con el fin de evitar o minimizar la oxidación y oxidación de los polvos. Por lo tanto, es conveniente realizar este proceso al vacío o en presencia de un gas inerte como

argón, helio o nitrógeno, siendo el primero el más empleado (Muñiz, 2021). En el caso del helio y nitrógeno, no suelen ser tan comunes como el argón, en particular el nitrógeno, debido a su reactividad y tendencia a formar compuestos con el material base (Perea, 2017).

3.7 Agente de control de proceso (ACP)

De la presencia del agente de control de proceso (agente controlante), depende la consecución del proceso del aleado mecánico, debido a que este elemento permite lograr un balance entre los ciclos de fractura y soldadura en frío, previniendo posibles aglomeraciones del material. Comúnmente los agentes controlantes son sustancias de naturaleza orgánica, como, por ejemplo: ácido esteárico, hexano, metanol, etanol, etc. Además, favorece la reducción de la unión entre partículas – paredes del contenedor (Arroyo, 2020).

Estos compuestos orgánicos suelen emplearse en cantidades de 0.3 - 4% en peso. La aplicación de un ACP controlante puede favorecer la formación de subproductos indeseables en el polvo. Es por ello que, cuando se busca elaborar una aleación de alta pureza, es recomendable no usar un agente controlante. En resumen, las principales condiciones para la elección de un ACP, depende de la naturaleza del polvo y las características finales del producto (Niekov, 2019).

4. Efectos de la dispersión de óxidos por aleado mecánico

La dispersión de óxidos genera modificaciones a nivel microestructural en la matriz metálica, modificando las propiedades mecánicas. Por medio de la dispersión de partículas, es posible reforzar el material base, debido a que dichas partículas forman obstáculos para impedir el libre movimiento de las dislocaciones. Además, factores como el sistema metálico involucrado, volumen de la muestra, tamaño de las partículas y el tipo de interacción entre ellas, influyen en el fortalecimiento obtenido (Gladman, 1999).

Las fuerzas que actúan sobre una dislocación móvil en un metal bajo tensión, y que contiene una dispersión de partículas, se muestran esquemáticamente en la Figura 4. Considerando el equilibrio de fuerzas entre la línea de tensión de la dislocación T y la fuerza de resistencia de la partícula F se establece la siguiente ecuación:

$$F = 2T \sin \theta \quad (1)$$

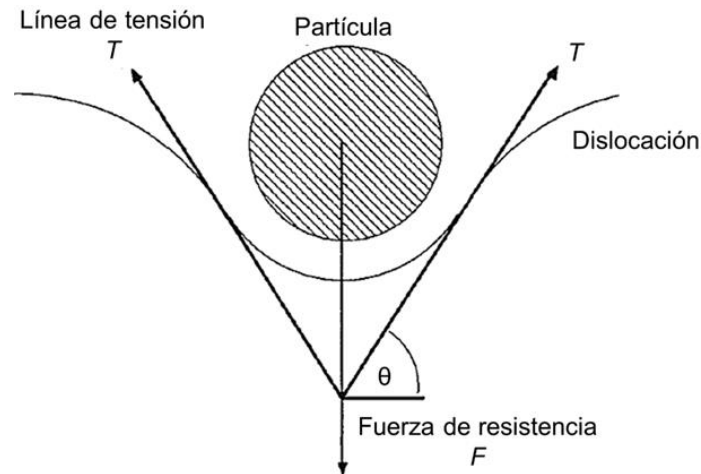


Figura 4. Esquema de las fuerzas involucradas durante la resistencia de las partículas al movimiento de dislocaciones. Adaptada de Gladman (1999).

En base a la Figura 4 y a la ecuación (1) se establece que, si se cuenta con una partícula dura, de tal manera que la fuerza de resistencia F sea mayor que $2T$, se dice que las dislocaciones rodearán la partícula y permanecerá sin cambios, es decir, no se deformará. En estas condiciones, la fuerza real de resistencia de la partícula se vuelve irrelevante, ya que el hecho de que las dislocaciones rodeen o eviten la partícula se vuelve dependiente sólo de la distancia existente entre las mismas. Por otro lado, como se muestra en la Figura 5, si la fuerza de resistencia de la partícula F es tal que se alcanzan sus valores máximos antes de que $\sin \theta = 1$, entonces las partículas serán cortadas y la dislocación pasará a través de ellas.

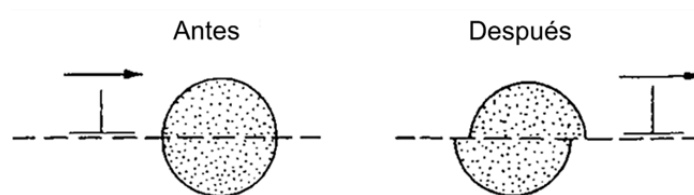


Figura 5. Movimiento de dislocaciones a través de una partícula. Adaptada de Gladman (1999).

De esto se concluye que, para un espacio existente entre partículas (según sea la fracción de volumen y tamaño), las partículas duras brindarán el máximo endurecimiento por precipitación y dispersión, por lo tanto, esta condición define el grado máximo de reforzamiento alcanzable (Gladman, 1999).

5. Caracterización de polvos obtenidos por aleado mecánico

Cuando se termina el proceso de aleado mecánico, el producto final que se obtiene en forma de polvo, pasa a una etapa fundamental dentro de la investigación y desarrollo de materiales avanzados. La etapa de caracterización de polvos finales permite conocer y evaluar características particulares de los materiales como su estructura cristalina, tamaños de cristales, composiciones químicas, fases, morfologías, etc. Además de poder comprender sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Por último, en la Tabla 3 se realiza una comparación acerca información proporcionada mediante las distintas técnicas de caracterización. Dicha información permitirá mejorar la eficiencia de los procesos de aleado mecánico, con el fin de diseñar nuevos materiales.

Tabla 3. Técnicas de caracterización empleadas para el análisis de polvos aleados mecánicamente e información que se obtiene. Elaboración propia, adaptada de Jaramillo (2011).

Técnica de caracterización	Información
Difracción de rayos X (DRX)	Estructura cristalina
	Tamaño de cristal
	Deformaciones de la red cristalina
	Evolución de la aleación
	Porcentaje de fases
Microscopía electrónica de barrido (MEB)	Composición química
	Orientación de las partículas
	Morfología de las partículas dispersas
	Constitución de fases
	Características microestructurales del polvo

Microscopia electrónica de transmisión (MET)	Tamaño de cristal
	Tamaño de partículas primarias (nanocristalinas y policristalinas)
	Forma de partículas de polvos finos
	Fase amorfa
Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS)	Estados de oxidación
	Estructura electrónica
	Composición química
	Verificación del estado del aleado mecánico
	Evolución de los componentes de aleación

6. Aceros inoxidables ODS en el sector energético

Los materiales estructurales que serán empleados en los reactores de fisión nuclear de Cuarta Generación serán sometidos a condiciones extremas donde los niveles de irradiación neutrónica y temperaturas serán más altos, en comparación a los reactores comerciales actuales. Estas condiciones producirán un gran número de defectos que provocarán en el material fenómenos de dilatación, fragilización y precipitación. Es por ello, que la construcción de nuevos reactores demanda materiales estructurales con capacidad de soportar los altos niveles de irradiación y altas temperaturas, cumpliendo con los requerimientos de seguridad y eficiencia (Peng y col., 2021).

Algunos de los candidatos a cumplir como materiales estructurales para los reactores Generación IV son los aceros inoxidables austeníticos, aceros inoxidables ferríticos, aceros inoxidables ferríticos/martensíticos (Ou Lahcen y col., 2021).

Los aceros inoxidables austeníticos, se empleaban como materiales estructurales para trabajar a altas temperaturas, esto debido a sus propiedades como la buena resistencia a la fluencia, degradación y corrosión. Dentro de los inconvenientes que los aceros inoxidables austeníticos (además de aleaciones a base de nickel) presentan, es que se ve limitado su uso como materiales estructurales en revestimientos de reactores nucleares. La razón principal es

que debido a su estructura cristalina cúbica centrada en las caras (a la que a partir de este momento se denominará como CCC), dichas aleaciones muestran baja resistencia a la irradiación (Chauhan y col., 2016). Por otra parte, dicha dilatación también es provocada por el aumento de la temperatura (por encima de 250°C) de funcionamiento del reactor (Griffiths, 2021).

6.1 Aceros inoxidables de doble fase ODS

Con el fin de encontrar materiales que puedan operar en altos rangos de temperatura y altas dosis de irradiación, se han buscado alternativas a los aceros inoxidables convencionales, llevando así al diseño de los aceros de doble fase (ferríticos/martensíticos: F/M) reforzados por dispersión de óxidos (ODS). Estos aceros cuentan con estructura cúbica centrada en el cuerpo (CC), lo que le brinda una mayor resistencia a la irradiación en comparación con los materiales con estructura cristalina CCC. Las aleaciones comerciales F/M se producen actualmente en diversas formas a nivel industrial, principalmente para las industrias de energía convencional y petroquímica (Cabet y col., 2019).

Los aceros F/M con alto contenido de cromo (9-12%) reforzados con dispersión de óxidos tienen propiedades térmicas mejoradas y buena resistencia a la irradiación en comparación con los aceros inoxidables austeníticos convencionales. Permitiendo que estos aceros ODS, sean materiales estructurales candidatos para los reactores nucleares Generación IV (Ou Lahcen y col., 2021).

6.2 Aceros inoxidables ferríticos ODS

El interés en aplicar este tipo de acero en los reactores de Cuarta Generación se debe a las buenas propiedades mecánicas que este acero posee al emplearse en medios con altas temperaturas, como consecuencia de la combinación y dispersión de óxidos estables en la matriz metálica. Para estos aceros, el lograr un mejoramiento en sus propiedades mediante la dispersión de óxidos, dependerá de una cantidad fina y densa de nanopartículas de óxidos. Dichas partículas, tendrán la función actuar como obstáculos al movimiento de las

dislocaciones, mejorando su comportamiento a altas temperaturas (Macía y col., 2019; Macía y col., 2021).

Además, la presencia de estos óxidos metálicos fomenta una mejora en la resistencia a la fragilización provocada por la radiación de neutrones. La presencia de concentraciones de cromo por encima del 13 % resulta eficaz para suprimir la corrosión, evitar la corrosión en estos materiales implica un reto, ya que tener altos contenidos de cromo produce en el acero ferrítico una separación de fases durante el envejecimiento a 475 °C (Gong y col., 2015; Cao y Zhou, 2021).

7. Investigaciones sobre aceros ODS elaborados por aleado mecánico

A continuación, en la Tabla 4 se presenta una comparación sobre los parámetros de aleado mecánico empleados en recientes trabajos de investigación. Es importante aclarar que los resultados obtenidos en los trabajos de investigación citados no dependen simplemente de los parámetros de aleado mecánico, si no de otras variables y etapas de la metalurgia de polvos como el compactado y el sinterizado. Por tal motivo, no es posible indicar que condiciones son o no mejores, dado que, para fines del tema desarrollado en el presente escrito, se limita solamente a los parámetros del aleado mecánico.

Tabla 4. Parámetros de aleado mecánico para la obtención de aceros ODS en recientes trabajos de investigación.

Autor(es)	Material obtenido	Parámetros				
		Molino	Tiempo (horas)	Velocidad (rpm)	Atmósfera	Relación bola:polvo
Zhao y col., 2018	Aceros reforzados con dispersión de óxidos con tres diferentes composiciones	Molino de bolas planetario	30	400	Argón alta pureza	15:1

Li y col., 2018	Acero 15Cr-ODS con adiciones de Ti y Zr	Molino planetario Fritsch Pulverisette 5	50	260	Argón alta pureza	10:1
Fu y col., 2019	Acero Eurofer a partir de polvos de Cr, W, Mn, V, Ta, Y ₂ O ₃ y Fe	Molino planetario Retsch	6 a 36	300	Argón	3.4:1
Oñoro y col., 2020	Acero ODS ferrítico, con composición nominal Fe-14Cr-2W-0.4Ti-0.3Y ₂ O ₃ en peso.	Molino planetario Retsch PM400	27	300	Hidrogeno	10:1
Kumar y col., 2020	Aceros inoxidables austeníticos a partir de polvos elementales puros y óxido de itrio (Y ₂ O ₃).	Molino planetario de bolas de alta energía	30	300	Argón alta pureza	10:1
Macía y col., 2021	Acero ferrítico ODS a partir de un polvo prealeado y polvos de Ti, Zr y Y ₂ O ₃ .	Molino horizontal de atrición	Prealeado y aleado de 2 horas cada uno	Prealeado a 200 rpm y aleado a 800 rpm	Argón alta pureza	20:1
Wu y col., 2021	Acero Fe-15Cr-2W-0.35Ti ODS reforzado con nanopartículas de Y ₄ Zr ₃ O ₁₂ .	Molino planetario	48	220	Argón	15:1

Seils y col., 2021	Aceros ODS con composiciones nominales de Fe-24Mn-0.4Ti-0.25Y ₂ O ₃ (24Mn) y Fe-34Mn-0.4Ti-0.25Y ₂ O ₃ (34Mn).	Molino planetario de bolas	48	200	Argón	10:1
Oñoro y col., 2022	Dos aceros ferríticos ODS con dos diferentes tamaños de partícula nominal 70 and 30 µm	Molino planetario Retsch PM400	27	300	Hidrogeno	10:1
Salur, 2022	Acero inoxidable ferrítico 9Cr reforzado dispersión de óxidos empleando itria (Y ₂ O ₃)	Molino planetario de bolas	Tiempos de 2, 8 y 16 h. Intervalos de trabajo de 30 min y 15 min de pausa	350	N/A	15:1

Conclusiones

Los aceros inoxidables ODS, son materiales con gran potencial en aplicaciones en el sector energético, específicamente como materiales de revestimientos en la construcción de generadores nucleares, con el fin de alcanzar mayores temperaturas de operación. Los mejores aceros inoxidables para reforzar con óxidos metálicos, esperando aplicarse en el sector de la energía nuclear, son los inoxidables ferríticos y los inoxidables dúplex, debido, principalmente, a su estructura cristalina cúbica centrada en las caras, que le brinda mayor resistencia a altas temperaturas y a los efectos de la radiación a la que se verán sometidos estos aceros, a diferencia de los inoxidables austeníticos.

El aleado mecánico es un proceso que se encuentra fuera del equilibrio que permite alea materiales que por métodos convencionales no sería posible realizar. Los polvos resultantes, quedarán deformados plásticamente, además de sufrir una soldadura en frío y con fracturas, debido a la alta energía de impacto con el medio de molienda. En este proceso, las partículas del polvo dúctil se deforman modificando su morfología y conforme se cumple el tiempo de aleado, el refinamiento de la microestructura continua pero la distribución del tamaño de partícula tiende a estabilizarse. A nivel microestructural, se producen modificaciones conforme se produce la dispersión de óxidos en la matriz metálica. Esto produce que las partículas de óxidos formen obstáculos que impidan el movimiento de las dislocaciones. Para que los mecanismos de fractura y soldadura en frío se produzcan de manera eficaz para los aceros ODS, el comportamiento mecánico de los componentes de los polvos deberá ser el sistema dúctil – frágil, debido a los componentes frágiles (óxidos metálicos) y componente dúctil (acero).

Como en todo proceso, los parámetros dentro del aleado mecánico son parte fundamental para lograr el éxito en la producción de materiales modificados ya que se permite el control de tamaño de partícula, la cantidad de energía transferida al material, lograr un material sin formación de nuevos productos (en caso de ser necesario), además de evitar la contaminación de polvos, etc.

Para evaluar las características del producto final como estructura cristalina, tamaño de cristal, evolución de la aleación, composición elemental, morfologías, etc., se suelen implementar distintas técnicas de caracterización como lo son la difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía electrónica de transmisión (MET) y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS).

Agradecimientos

El autor de esta revisión da sus más sinceros agradecimientos al programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia, perteneciente a la Facultad de Metalurgia (UAdeC) y al Instituto Tecnológico Saltillo (ITS), por sus aportaciones y apoyo en la escritura del

presente documento. Se agradece de igual forma al CONACYT por el apoyo económico brindado este periodo.

Referencias

- Ahamed, H., & Kumar, V. S. (2011). A Comparative Study on the Milling Speed for the Synthesis of Nano-Structured Al 6063 Alloy Powder by Mechanical Alloying. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 10(6): 507-515 <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.106038>
- Akhtar, S., Saad, M., Misbah, M., & Sati, M. (2018). Recent Advancements in Powder Metallurgy: A Review. *Materials Today: Proceedings*. 5: 18649-18655. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.210>
- Arroyo, C. (2020). Síntesis de las aleaciones de alta entropía FeCoCrNiCu y FeCoCrNiMn por aleado mecánico. *Memorias del XXVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Michoacán, México. https://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A2_92.pdf
- Azpitarre, O. (2018). Reactores nucleares de generación IV. *TEC100*: 29-38. <http://190.12.101.91/jspui/handle/1847939/1620>
- Balzuweit. (2020). Molino vibratorio. Siebtechnik Tema. <https://www.siebtechnik-tema.nl/es/molino-vibratorio/> Fecha de consulta: 29 de octubre de 2023
- Cabet, C., Dalle, F., Gaganidze, E., Henry, J., & Tanigawa, H. (2019). Ferritic-martensitic steels for fission and fusion applications. *Journal of Nuclear Materials*. 523: 510-537. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.05.058>
- Cao, S., & Zhou, Z. (2021). Microstructure and mechanical properties of an ODS ferritic steel with very low Cr content. *Journal of Nuclear Materials*. 551: 152971. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152971>
- Chauhan, A., Litvinov, D., & Aktaa, J. (2016). High temperature tensile properties and fracture characteristics of bimodal 12Cr-ODS steel. *Journal of Nuclear Materials*. 468: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.11.013>
- Daswa, P., Gxowa, Z., Monareng, M. J. I., & Mutombo, K. (2018). Effect of milling speed on the formation of Ti-6Al-4V via mechanical alloying. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 430: 1-5. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/430/1/012030>
- Fu, J., Brouwer, J. C., Richardson, I. M., & Hermans, M. J. M. (2019). Effect of mechanical alloying and spark plasma sintering on the microstructure and mechanical properties of ODS Eurofer. *Materials & Design*. 177: 107849. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107849>

- Gheisari, K., Javadpour, S., Oh, J. T., & Ghaffari, M. (2009). The effect of milling speed on the structural properties of mechanically alloyed Fe-45%Ni powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 472(1): 416-420. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.04.074>
- Gladman, T. (1999). Precipitation hardening in metals. *Materials Science and Technology*. 15(1): 30-36. <https://doi.org/10.1179/026708399773002782>
- Gong, M., Zhou, Z., Hu, H., Zhang, G., Li, S., & Wang, M. (2015). Effects of aluminum on microstructure and mechanical behavior of 14Cr-ODS steels. *Journal of Nuclear Materials*. 462: 502-507. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.079>
- Griffiths, M. (2021). Effect of neutron irradiation on the mechanical properties, swelling and creep of austenitic stainless steels. *Materials*. 14: 25-42. <https://doi.org/10.3390/ma14102622>
- Hajalilou, A., Kianvash, A., Lavvafi, H., & Shameli, K. (2018). Nanostructured soft magnetic materials synthesized via mechanical alloying: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 29(2): 1690-1717. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-8082-0>
- Hassan, A., Abd El-Hamid, M., Wagih, A., & Fathy, A. (2014). Effect of Mechanical Milling on the Morphology and Structural Evaluation of Al-Al₂O₃ Nanocomposite Powders. *International Journal of Engineering*. 27(4): 625-632. https://www.ije.ir/article_72292.html
- Hernández, P. (2017). Factores de influencia en la activación mecánica de materiales. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. 9(17): 7-10. <http://www.biochemtech.uadec.mx/2017/06/01/factores-de-influencia-en-la-activacion-mecanica-de-materiales/>
- Jaramillo, H., Alba, N. & Arnaldo, J. (2011). Fundamentos y aspectos generales del aleamiento mecánico (Primera edición) *Universidad Autónoma de Occidente*. (pp. 41-54). Colombia.
- Khakbiz, M. & Akhlaghi, F. (2008). Effect of mechanical alloying process parameters on characteristics of Al-B₄C nanocomposite-nanocrystalline powder particles. *International Journal of Modern Physics B – IJMPB*. 22: 2924-2932. <https://doi.org/10.1142/S0217979208047766>
- Kumar, P. K., Sai, N. V., Krishna, A. G., & Renganathan, N. G. (2020). Fabrication and micro-structural evaluation of ODS austenitic stainless steels through mechanical alloying. *Materials Today: Proceedings*. 23: 465-468. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.207>
- Li, W., Xu, H., Sha, X., Meng, J., Wang, W., Kang, C., Zhang, X., & Wang, Z. (2018). Microstructural characterization and strengthening mechanisms of a 15Cr-ODS steel

- produced by mechanical alloying and Spark Plasma Sintering. *Fusion Engineering and Design*. 137: 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.08.020>
- Lobov. (2023). Spex SamplePrep 8000D-230 Dual-Clamp Mixer/Mill Grinder; 230 VAC/50 Hz. Lobov. <https://www.lobov.com.ar/spex-sampleprep-8000d-230-dual-clamp-mixer-mill-grinder-230-vac-50-hz--det--04578-11> Fecha de consulta: 29 de octubre de 2023
- Lou, X., & Gandy, D. (2019). Advanced Manufacturing for Nuclear Energy. *JOM*. 71(8): 2834-2836. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03607-4>
- Macía, E., García-Junceda, A., Serrano, M., Hernández-Mayoral, M., Díaz, L. A., & Campos, M. (2019). Effect of the heating rate on the microstructure of a ferritic ODS steel with four oxide formers (Y-Ti-Al-Zr) consolidated by spark plasma sintering (SPS). *Journal of Nuclear Materials*. 518: 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.02.043>
- Macía, E., García-Junceda, A., Serrano, M., Hong, S. J., & Campos, M. (2021). Effect of mechanical alloying on the microstructural evolution of a ferritic ODS steel with (Y-Ti-Al-Zr) addition processed by Spark Plasma Sintering (SPS). *Nuclear Engineering and Technology*. 53(8): 2582-2590. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.002>
- Mendoza, D. (2009). *Nanocompósitos Aleación de Aluminio 7075 - Nanopartículas de Plata Recubiertas con Grafito producidos por Aleado Mecánico*. Tesis de maestría. Centro de Investigación de Materiales Avanzados. Chihuahua, México. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/893>
- Mucsi, G. (2019). A review on mechanical activation and mechanical alloying in stirred media mill. *Chemical Engineering Research and Design*. 148: 460-474. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.06.029>
- Muñiz, C. (2021). *Síntesis y caracterización de la aleación Ti-6Al-7Nb para aplicaciones biomédicas*. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua, México. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2621>
- Murty, B. S., & Ranganathan, S. (1998). Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling. *International Materials Reviews*. 43(3): 101-141. <https://doi.org/10.1179/imr.1998.43.3.101>
- Neikov, O. D. (2019). Mechanical Alloying. In O. D. Neikov, S. S. Naboychenko, & N. A. Yefimov (Eds.), *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (Second Edition) (pp. 91-124). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100543-9.00003-8>
- Nuclear Energy Agency. (2014). *Technology roadmap update for Generation IV nuclear energy systems* OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International

- Forum. <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>
- Oñoro, M., Macías-Delgado, J., Auger, M. A., de Castro, V., & Leguey, T. (2020). Mechanical properties and stability of precipitates of an ODS steel after thermal cycling and aging. *Nuclear Materials and Energy*. 24: 100758. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100758>
- Oñoro, M., Macías-Delgado, J., Auger, M. A., Hoffmann, J., de Castro, V., & Leguey, T. (2022). Powder Particle Size Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Mechanically Alloyed ODS Ferritic Steels. *Metals*. 12(1): 1-16. <https://doi.org/10.3390/met12010069>
- Ou Lahcen, E. M., Ángel Alcázar, M. M., & Almeida, C. P. (2021). New high strength ODS Eurofer steel processed by mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*. 817: 141288. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141288>
- Peng, S., Lu, Z., & Yu, L. (2021). Effects of Y₂O₃/Ti/Zr addition on microstructure and hardness of ODS-CoCrFeNi HEAs produced by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*. 861: 157940. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157940>
- Perea, D. (2017). Estudio del efecto de la adición de SiC, WC y TiC en la aleación Ti-Zr sobre su microestructura, propiedades físicas y mecánicas. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas, México. <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/bitstream/20.500.11845/1994/1/TESIS%20DIANA%20PEREA.pdf>
- Pérez, R. (2013). *Procesado y evaluación de aleaciones Ti-15Mo mediante tecnologías de polvos no convencionales*. Trabajo de fin de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla, España. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5243/fichero/PFC+Rafael+P%C3%A9rez+G%C3%B3mez.pdf>
- Perpiñá, S. (2021). *Reactores nucleares del futuro. Camino a la sostenibilidad a largo plazo de la energía nuclear*. Trabajo de fin de grado. Universidad de Valladolid. Valladolid, España. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47244>
- Retsch. (2023) Molienda : Molinos de bolas : PM 300. <https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-bolas/pm-300/> Fecha de consulta: 29 de octubre de 2023
- Rochman, N. T., Kuramoto, S., Fujimoto, R., & Sueyoshi, H. (2003). Effect of milling speed on an Fe–C–Mn system alloy prepared by mechanical alloying. *Journal of Materials Processing Technology*. 138(1): 41-46. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00046-3)

- Rodriguez, G. (2021). *Síntesis, caracterización y comportamiento al desgaste de una aleación Al-Cu-Mg reforzada con carburo de tungsteno*. Tesis de doctorado. Centro de Investigación de Materiales Avanzados. Chihuahua, México. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2623>
- Ruys, A., Gingu, O., Sima, G., & Maleksaeedi, S. (2015). Powder Processing of Bulk Components in Manufacturing. In A. Y. C. Nee (Ed.), *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology* (pp. 487-566). Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4_48
- Salur, E. (2022). Structural evolution of mechanically alloyed ODS steel powders during ball milling and subsequent annealing treatment. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 6(2): 80-89. <https://doi.org/10.35860/iarej.1075508>
- Šćepanović, M., Leguey, T., Auger, M. A., Lozano-Perez, S., Armstrong, D. E. J., García-Cortés, I., & de Castro, V. (2018). Characterisation of ODS Fe-14Cr-2W-0.3Ti before and after high temperature triple and low temperature single ion irradiations. *Materials Characterization*. 136: 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.12.025>
- Seils, S., Kauffmann, A., Delis, W., Boll, T., & Heilmaier, M. (2021). Microstructure and mechanical properties of high-Mn-ODS steels. *Materials Science and Engineering: A*. 825: 141859. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141859>
- Shuai, C., He, C., Peng, S., Qi, F., Wang, G., Min, A., Yang, W., & Wang, W. (2021). Mechanical Alloying of Immiscible Metallic Systems: Process, Microstructure, and Mechanism. *Advanced Engineering Materials*. 23(4): 2001098. <https://doi.org/10.1002/adem.202001098>
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*. 46(1): 1-184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
- Suryanarayana, C. (2019). Mechanical Alloying: A Novel Technique to Synthesize Advanced Materials. *Research*. 2019: 1-17. <https://doi.org/10.34133/2019/4219812>
- Suryanarayana, C. (2022). Mechanical alloying: a critical review. *Materials Research Letters*. 10(10): 619-647. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2075243>
- Suryanarayana, C., & Ivanov, E. (2003). Mechanical Alloying for Advanced Materials. *Powder Materials: Current Research and Industrial Practices III* (pp. 169-178). <https://doi.org/10.1002/9781118984239.ch17>
- Suryanarayana, C., Ivanov, E., & Boldyrev, V. V. (2001). The science and technology of mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*. 304-306: 151-158. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01465-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01465-9)

- Wu, Y., Zhao, H., Li, J., Zhang, Y., & Liu, T. (2021). Effects of $Y_4Zr_3O_{12}$ addition on the microstructure and mechanical properties of Fe-15Cr-2W-0.35Ti ODS steels. *Materials Science and Engineering: A*. 804: 140734. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140734>
- Zhao, Q., Yu, L.-m., Liu, Y.-c., Huang, Y., Ma, Z.-q., & Li, H.-j. (2018). Effects of aluminum and titanium on the microstructure of ODS steels fabricated by hot pressing. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 25(10): 1156-1165. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1667-7>
- 911Metallurgist. (2021). Molino de Atrición. <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/molino-de-atricion/> Fecha de consulta: 29 de octubre de 2023