

Ensayo expositivo

Aleaciones de alta entropía, la cúspide actual en la evolución de los materiales metálicos

High entropy alloys, the current pinnacle in the evolution of metallic materials

Alfredo Martínez García^{1*}, Carlos Gamaliel Garay Reyes¹
Erick Adrián Juárez Arellano², Roberto Martínez Sánchez¹

¹Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural
Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados (CIMAV)

²Instituto de Química Aplicada
Universidad del Papaloapan

Autor de correspondencia:
alfredo.martinez@cimav.edu.mx

Recibido:10-05-2023 Aceptado: 25-08-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

A lo largo de la historia, la humanidad ha modificado diversos elementos metálicos de su entorno para satisfacer sus necesidades. Esto genera un punto de inflexión que impulsa el desarrollo tecnológico de la sociedad al fabricar dispositivos y herramientas a partir de los materiales disponibles. En este caso, los metales tienen una importancia notable al dividir las eras según el tipo de materiales metálicos utilizados, conocidas como eras de los metales. Hoy en día, estas se pueden dividir en 6: la era del cobre, del bronce, del hierro, del acero, de las superaleaciones y de las aleaciones de alta entropía. Así, en este artículo se describen brevemente las principales características de cada uno de estos materiales metálicos y su papel en el desarrollo y evolución de la humanidad en cada era.

Palabras clave: Metales y aleaciones, historia de la humanidad, aleaciones de alta entropía, diseños de aleaciones.

Abstract

Throughout history, humanity has modified various metallic elements from its environment to meet your needs. This generates a turning point that drives the technological development of society by manufacturing devices and tools from available materials. In this case, metals have a notable importance in dividing eras according to the type of metallic materials used, known as metal ages. Today, these can be divided into 6: the age of copper, bronze, iron, steel, superalloys and high entropy alloys. So, this article briefly describes the main characteristics of each of these metallic materials and their role in the development and evolution of humanity in each age.

Keywords: Metals and alloys, history of humanity, high entropy alloys, alloy designs.

Introducción

El tiempo en la historia de la humanidad previo al uso de metales se le conoce como la edad de piedra debido a que el principal material empleado para la elaboración de utensilios fueron rocas de diferente tipo. Sin embargo, el manejo de los metales inicia con las primeras evidencias de fundiciones, las cuales se remonta a los 6000 años a. C. aproximadamente, y termina con la invención de la escritura alrededor de 100 años a. C. Los historiadores han subdividido este periodo (6000-100 a. C.) en tres edades conocidas como: la edad del cobre, la edad del bronce y la edad

del hierro. Aunque la edad de los metales terminó con la invención de la escritura, tuvieron que pasar más de 2000 años hasta llegar a la edad contemporánea para que los metales dieran otro salto tecnológico, pasando de la edad del hierro al desarrollo acero (siglo XIX) y posteriormente al desarrollo de aleaciones y superaleaciones de alto rendimiento (siglo XX). Sin embargo, el inicio del siglo XXI ha dado origen a nuevos materiales conocidos como aleaciones de alta entropía (ver la Figura 1). Actualmente estos nuevos materiales han tomado una gran importancia

debido a la mejora en sus propiedades mecánicas, estabilidad química, térmicas, eléctricas, electroquímicas, etc. y su potencial aplicación en la industria energética, aeroespacial, médica entre otras.

Prehistoria

Edad de Cobre

El inicio del uso de los metales varía dependiendo de la región geográfica del planeta, pero la mayoría coincide que el primer metal en ser usado fue el cobre en Oriente Medio. El cobre es un metal que pertenece a un pequeño grupo de metales que se pueden encontrar en forma nativa en el planeta, así que su disponibilidad dependía de los agregados de cobre encontrados. Los primeros objetos de cobre en ser encontrados datan de 9000 años a.C., los cuales se especula fueron utensilios forjados en frío por martillado. Posteriormente, se descubrió que por fundición de rocas minerales como cuprita, malaquita y calcopirita se podía extraer el cobre. Sin embargo, fue hasta 6000 a.C. que se obtuvo evidencia de los primeros

materiales de cobre obtenidos por fundición. El uso que se le dio al cobre inicialmente fue en la fabricación de utensilios y artículos ornamentales debido a su baja dureza, por lo que su uso en la fabricación de armas no fue de gran importancia. Con el paso del tiempo, el cobre paso de formar parte de adornos y decoraciones a la fabricación de herramientas especializadas para la agricultura, ganadería y transporte. Este evento potencio el aumento en la generación de riqueza y la especialización de trabajos en la sociedad.

Sin embargo, el agotamiento de la materia prima fue evidente hacia los 3000 años a.C. y los humanos idearon nuevos procedimientos (horneado) que les permitiera tener un mejor manejo del cobre. Por lo que, se marcó el inicio del descubrimiento de las aleaciones. La primera aleación conocida del mundo antiguo es el bronce, el cual es considerado la innovación tecnológica que le pondría fin a la edad de cobre alrededor de los 3000 años a. C.

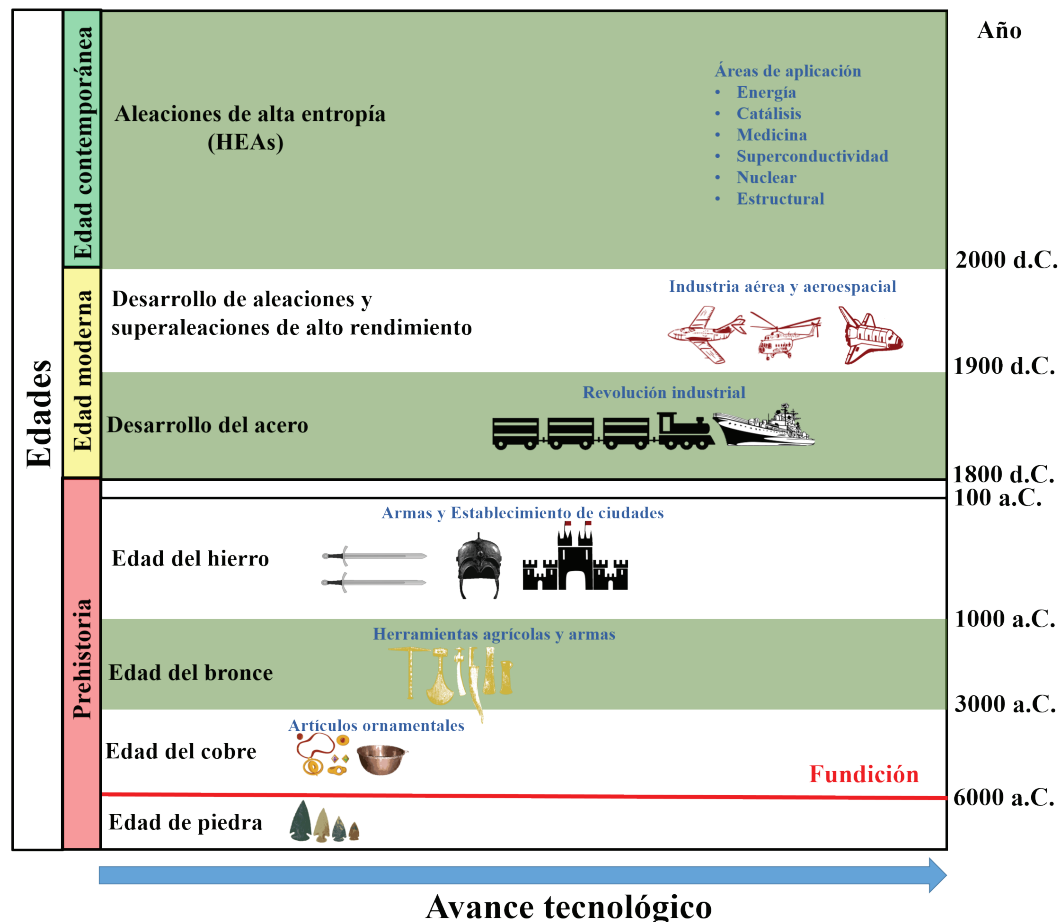


Figura 1. Metales y aleaciones que han marcado una época en el desarrollo de la humanidad.

Fuente: Elaboración propia.

Edad de Bronce

Los historiadores han marcado este periodo de tiempo con ciertas diferencias temporales que van de los 3000-1000 años a.C. Al igual que el cobre, los primeros artículos de bronce fueron encontrados en Oriente Medio alrededor del año 3000 a.C. en lo que fue la antigua Sumeria, considerada la primera civilización del mundo. El bronce fue la primera aleación conocida en el mundo que consiste en la unión de cobre y una fracción de estaño que podría alcanzar hasta un 10 % en peso. Las herramientas fabricadas con esta aleación son más resistentes a la corrosión y con mayor dureza que las elaboradas con su predecesor el cobre. Otra de las grandes ventajas del bronce, que depende de su composición, es su menor punto de fusión (890-920 °C) comparado con el cobre (1085 °C), lo que permitió un mejor manejo y una considerable reducción en los costos y dificultades de producción. Además, el reducido número y localización de los yacimientos de los minerales de estaño requerido para la fabricación de bronce, generó un importante despliegue comercial entre los diferentes pueblos. De alguna manera, esto fue uno de los factores detonantes para la formación de las primeras ciudades-estado (Mesopotamia, Egipto, Micenas), así como la consolidación de la agricultura y el comercio entre diferentes culturas.

El bronce no sólo potenció el crecimiento de las civilizaciones, sino que también generó conflictos bélicos por el control de los recursos entre los diferentes pueblos. Los conflictos alcanzaron situaciones extremas hasta el punto de la erradicación de imperios, destrucción y desaparición de ciudades. El colapso de estas civilizaciones (Mesopotamia, y Micenas) marcaría el final de la era de bronce.

Edad de Hierro

El hierro es uno de los 4 elementos más abundante en el planeta y se encuentra disponible en la naturaleza en forma de yacimientos minerales como: hematita, limonita, magnetita y siderita. Sin embargo, el principal factor que retardo el uso de este metal por los pueblos de la prehistoria fue la falta de tecnología, debido a la gran dureza del metal y a la alta temperatura requerida para su forja (1200 °C). Aunque, hay evidencia que la humanidad tenía conocimientos del hierro desde 3000 años a.C. fue hasta 1000 años a.C. que tomó un lugar importante en la historia.

Los conflictos bélicos y migraciones que desestabilizaron el Oriente Medio entre los 2000-1000 años a.C. resultaron en la escasez de bronce para la elaboración de armas. Por otro lado, para la expansión de los imperios en este periodo fue fundamental la construcción de armas nuevas y la generación de tecnología bélica que permitiera una superioridad militar, el hierro cumplió con esta misión. Por lo tanto, el remplazo del bronce por el hierro para fabricación de armas y herramientas fue inminente. Los artículos hechos con hierro presentaron mayor dureza y resistencia que los elaborados con otro material conocido hasta entonces. Así, el uso de este metal se popularizó y extendió en diferentes civilizaciones dando lugar al inicio de la edad de hierro (1000-100 a.C.).

Los conocimientos para la forja de artículos de hierro implicaron un salto tecnológico en la agricultura, comercio y la guerra. La mejora en estos sectores influyó directamente en el ámbito económico, cultural y social de los asentamientos humanos. Sin embargo, el final de esta etapa de la humanidad fue marcado por la aparición de los sistemas de escritura en diferentes culturas, no obstante, el dominio del hierro se extendió por otros dos milenios más.

Edad Moderna

Desarrollo del Acero

Al final de la edad de hierro (100 años a.C.) no sólo se conocían el cobre, estaño y hierro, también se tuvo conocimiento de otros metales como oro, plata, mercurio que no fueron utilizados en la formación de aleaciones. Aunque tenían importancia comercial, su manejo no consideró un cambio significativo en la sociedad debido a que son muy blandos para la fabricación de herramientas y armas. Después de la edad del hierro (100 a.C.), este metal siguió dominando en la fabricación de armas y herramientas. Sin embargo, con el avance del tiempo se exploraron técnicas para mejorar el endurecimiento de las armas, lo que dio lugar a la segunda aleación más importante hasta entonces descubierta. Esta aleación fue conocida como acero, la cual consiste en una mezcla de hierro y una fracción de carbono (0.008-2.11 % peso).

Los primeros indicios que demuestran la importancia del acero datan del siglo XVIII con la mecanización de la producción textil a partir del algodón, a este periodo se le conoció como la primera revolución industrial. Sin embargo, el impacto no fue signifi-

cativo debido que no se contaba con los conocimientos y tecnologías necesarias para manejar un control adecuado del contenido de carbono en la aleación. Por lo que la aleación tenía un alto contenido de carbono que lo hacía más duro pero frágil. No obstante, fue a mediados del siglo XIX que la introducción del método propuesto por Henry Bessemer para la fabricación de acero marco un cambio sustancial en el desarrollo y fabricación de estas aleaciones. La técnica consistía en retirar las impurezas y el exceso de carbono del hierro mediante la oxidación producida por la inyección de aire dentro del hierro fundido. Este proceso permitió fabricar grandes cantidades de acero, de forma rápida y económica. Dando como resultado un acelerado crecimiento industrial que fue conocido como la segunda revolución industrial (He, K., & Wang, L. 2017). Este acontecimiento marco el desarrollo del acero y durante este tiempo fueron creadas obras de ingeniería y desarrollos tecnológicos que en épocas pasadas no era posible imaginar (ferrocarril, puentes, barcos, etc.).

Desarrollo de aleaciones y superaleaciones de alto rendimiento

Los desarrollos tecnológicos del siglo XIX aceleraron las transformaciones económicas, sociales y políticas del siglo XX, dando lugar también a los dos conflictos bélicos más grandes conocidos por la humanidad (La primera y segunda guerra mundial). Las guerras, durante el siglo XX, impulsaron un enorme salto tecnológico dando lugar a la aparición de reactores nucleares, motores de combustión interna, turbinas de turbocompresores, aviones cohetes, barcos, centrales eléctricas, intercambiadores de calor, y diferentes dispositivos que posteriormente revolucionaron la industria química y petrolera. Así, las innovaciones tecnológicas demandaron nuevos materiales con propiedades mecánicas capaces de resistir condiciones extremas de alta temperatura, alta presión, corrosión, oxidación y ataques del medio ambiente de trabajo. A estos nuevos materiales se les conoció como aleaciones y superaleaciones de alto rendimiento (Hart, G. L., 2021).

Una gran cantidad de aleaciones y superaleaciones fueron fabricadas durante este periodo de tiempo, las cuales se pueden clasificar en aleaciones ferrosas y no ferrosas. Las aleaciones ferrosas tienen como metal mayoritario al hierro, y minoritario a

otros metales (manganeso, níquel, vanadio, cromo, cobalto) y no metales (carbono, fósforo, silicio, azufre). Por otro lado, las aleaciones no ferrosas tienen como elemento mayoritario a metales como: aluminio, cobre, níquel, cobalto y titanio.

No todas las aleaciones son consideradas superaleaciones, solo se denominan así aquellas aleaciones con propiedades mecánicas que resisten condiciones extremas de operación a elevada temperatura ($> 540^{\circ}\text{C}$). Las aleaciones base níquel, cobalto, hierro y titanio en combinación con cantidades pequeñas de tungsteno, molibdeno, tantalio, niobio, cromo y aluminio, pertenecen a este grupo. Algunas de las familias de superaleaciones comerciales con aplicación directa son: Hastelloy, Inconel, Waspaloy o René. Hastelloy (cobalto, cromo, níquel) se utiliza actualmente en la fabricación de motores de aviones. Inconel (níquel, cromo, hierro) es empleado para motores de cohetes. Waspaloy (cobalto, cromo, níquel) es usado en turbinas de gas. René (base níquel) es usada en la fabricación de misiles.

A pesar de las excelentes propiedades de las superaleaciones, el avance del desarrollo tecnológico de siglo XXI se ha visto limitado debido a que se requieren nuevos materiales con características y propiedades que superen a las superaleaciones. Por lo tanto, una nueva generación de aleaciones ha comenzado a tomar interés y podría darle fin a la era de las superaleaciones, las cuales son conocidas como aleaciones de alta entropía (HEAs por sus siglas en inglés, High Entropy Alloys).

Edad Contemporánea

Como se ha descrito anteriormente, en la antigüedad tuvieron que pasar milenios para que los metales marcaran un cambio en la forma de vida de las civilizaciones. Sin embargo, desde el siglo XIX el impacto tecnológico de los metales en la sociedad se ha acortado a cada 100 años. Durante el siglo XIX fueron los aceros, en el siglo XX fueron las superaleaciones y a inicios del siglo XXI ha surgido un nuevo grupo de aleaciones conocidas como aleaciones de alta entropía. Estas aleaciones están en su fase de investigación, pero han mostrado características y propiedades que superan por mucho a los materiales conocidos hasta ahora.

Origen de las Aleaciones de alta entropía (HEAs)

Desde la prehistoria hasta el siglo XIX la selección y producción de aleaciones se ha basado en el concepto de dos elementos, un metal mayoritario y otro elemento (metal, no metal) en menor cantidad. Bajo este concepto se generaron múltiples aleaciones que fueron responsables de grandes cambios en el desarrollo de la sociedad. Sin embargo, en el siglo XX se abrió un nuevo panorama con la llegada de las superaleaciones, donde más de dos elementos principales fueron usados para su fabricación. Sin embargo, aún en las superaleaciones existe una limitante en el número de elementos principales, dando como resultado que el desarrollo de la microestructuras, propiedades y aplicaciones presenten limitaciones. Es así, que un nuevo grupo de aleaciones conocidas como HEAs comenzó a tomar interés debido a que son aleaciones que contienen 5 o más elementos principales.

Hay evidencia de que las primeras investigaciones de estas aleaciones se remontan desde 1778 por el científico alemán Franz Karl Achard, el cual estudió aleaciones de cinco a siete elementos con la misma concentración en masa de cada elemento. Sin embargo, tuvieron que pasar 200 años para que se retomara el estudio de estas aleaciones. En la última década del siglo XX, tres grupos de investigación completamente independientes liderados por Brian Cantor (Inglaterra), Jien-Wei Yeh (Taiwan) y Srinivasa Ranganathan (India) comenzaron a estudiar estas aleaciones. Aunque en un inicio estas aleaciones fueron conocidas como aleaciones de elementos principales (Cantor, B. et al. 2004), fue en el 2004 que el término HEAs fue acuñado por Jien-Wei Yeh y colaboradores (Yeh, J. W. et al. 2004).

Diseño de aleaciones de alta entropía (HEAs)

La definición inicial de HEAs solo considera la composición de las aleaciones, cada una con una concentración atómica entre el 5-35 %. Esta definición implica la estricta formación de una solución sólida desordenada. Sin embargo, en la práctica, se pueden formar más de una estructura en la solución sólida además de compuestos intermetálicos y fases amorfas que no presentan una estructura ordenada, dependiendo de la composición de la aleación. Por lo tanto, con el objeto de predecir la formación de las diferentes fases se consideró usar parámetros fisicoquímicos como: entropía, radio atómico y energía libre de Gibbs, (ver la Figura 2). (Murty, B. S. et al. 2019).

Entropía: El término entropía incluye las contribuciones configuracionales, vibratorias, electrónicas y magnéticas de los elementos. Para reducir las variables de cálculo sólo se considera la entropía configuracional de la mezcla de los metales en estado puro. Por lo tanto, considerando la ecuación de Boltzman, la entropía (ΔS_{conf}) para la mezcla de metales aleatorios de n componentes de composición en fracción atómica (x_i), está dada por la ecuación (1).

Donde R es la constante ideal de los gases, i es el número de elementos de 1 hasta n y x_i es la fracción atómica. Las HEAs que forman soluciones sólidas tienen valores de entropía configuracional mayor que $1.5R$, sin importar si son monofásicos o multifásicos.

$$\Delta S_{conf} = -R \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (1)$$

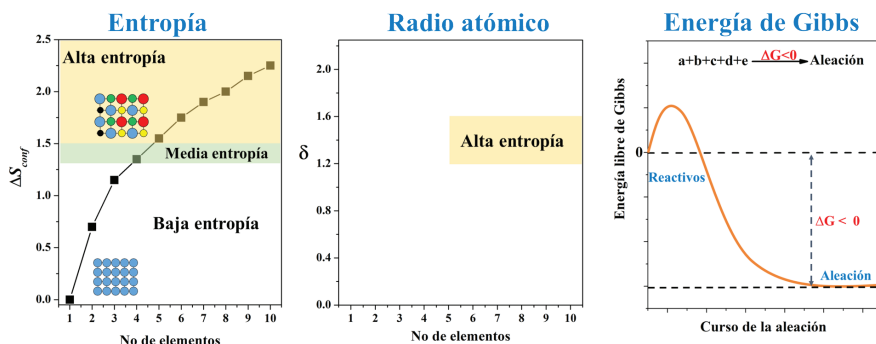


Figura 2. Parámetros fisicoquímicos que se deben cumplir para favorecer la formación de aleaciones de alta entropía (HEAs), donde ΔS_{conf} y δ representan la entropía configuracional y la diferencia de radio atómico del sistema, respectivamente. **Fuente:** Adaptado de Murty, B. S. et al. (2019).

Radio atómico: La diferencia de radio atómico en las HEAs es uno de los factores que afecta la formación de la solución sólida debido a la distorsión de la red cristalina. La diferencia de radio atómico en las HEAs permite a los átomos de los diferentes elementos tener la misma probabilidad de ocupar los sitios en la red de la solución sólida. Por lo tanto, el ordenamiento de la red es distinto a la del metal puro y de las aleaciones comunes. Este hecho motivó a adoptar un nuevo parámetro (δ) que describe el efecto de la diferencia de tamaño atómico en la HEAs, y está descrito por la ecuación (2).

Donde i es el número de elementos de 1 hasta n y x_i es la fracción atómica y r_i es el radio atómico de cada elemento. Este parámetro ha permitido identificar que una diferencia entre los radios atómicos de aproximadamente 1.1-1.6 adimensional en los componentes de la HEAs aumenta la posibilidad de formar soluciones sólidas.

Energía libre de Gibbs: La formación de fases está termodinámicamente controlada por la energía libre de Gibbs (ΔG), que depende de la competencia entre la entalpía (ΔH) y la entropía (ΔS), dada por la ecuación (3).

La formación de fases presenta tres posibles escenarios: fases elementales, intermetálicos y soluciones sólidas (amorfa o cristalina). Las fases elementales dependen de la estructura de los metales puros.

Las fases intermetálicas (compuestos intermetálicos) se forman de aleaciones de dos o más elementos de la mezcla y son estequiométricas. Por otro lado, la solución sólida está constituida por todos los elementos de la mezcla y puede presentar estructura amorfa o cristalina con diferente empaquetamiento o estructura cristalina, cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC) o hexagonal compacto (HCP). La estructura final de la HEAs será aquella que alcance el equilibrio a menor energía libre de Gibbs de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

Procesos de síntesis

Los procesos para la síntesis o fabricación de HEAs dependen en gran medida de la aplicación que se le pretende asignar: por ejemplo, como piezas, películas o polvos. Por lo tanto, las rutas de síntesis se dividen en tres grupos, líquida, sólida y gaseosa, como se ve en Figura 3 (Zhang, C. et al. 2016).

La ruta líquida consiste en fabricar aleaciones al pasar los metales del estado sólido al líquido. A este proceso se le conoce comúnmente como fusión es la técnica más antigua conocida para el procesamiento

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i \left(1 - \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n x_i r_i} \right)^2} \quad (2)$$

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \quad (3)$$

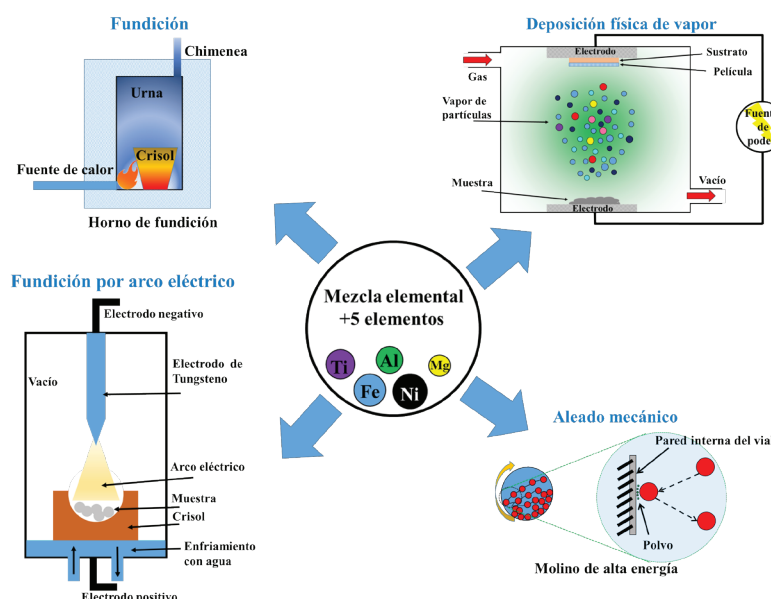


Figura 3. Métodos de síntesis más comunes para la fabricación de aleaciones de alta entropía (HEAs).

Fuente: Elaboración propia.

de metales y es la más usada en la síntesis de HEAs. Básicamente la técnica consiste en elevar la temperatura por encima del punto de fusión de los componentes. Sin embargo, aunque el proceso es muy simple, existe una gran variedad de métodos entre los que se incluyen, fundición de solidificación de Bridgman, fusión por arco-eléctrico, fusión por inducción, fusión por láser etc. Mediante estos métodos se pueden alcanzar temperaturas cercanas a los 3000 °C, lo cual es suficiente para fundir la mayoría de los metales utilizados para fabricar HEA. Sin embargo, uno de los inconvenientes de estas técnicas es la diferencia en los puntos de fusión de los componentes, por lo que el control de la composición en la aleación se dificulta. Otro inconveniente es la lenta velocidad de solidificación que favorece el desarrollo de mecanismos de segregación en la microestructura de la aleación. La microestructura típica de las HEAs obtenidas por esta vía es de naturaleza dendrítica con segregación interdendrítica.

La segunda ruta de síntesis se lleva a cabo en estado sólido y el producto resultante son polvos aleados que posteriormente son consolidados por sinterizado. El principio de esta técnica consiste en la difusión de los átomos entre los componentes de una mezcla de polvos elementales mediante energía mecánica hasta obtener una aleación. Este proceso se conoce comúnmente como aleado mecánico e involucra la deformación continua, fractura y soldadura de partículas que usualmente conducen a la formación de una solución sólida cristalina o amorfa. El aleado mecánico se puede llevar a cabo en diferentes tipos de molinos de bolas de alta energía que pueden ser planetarios o vibratorio. Las ventajas del uso del aleado mecánico como método de síntesis de HEAs incluyen el fácil manejo de operación, excelente homogeneidad en la composición de la aleación se lleva a cabo a temperatura ambiente, elimina la segregación y se pueden manejar mezclas de materiales con diferentes puntos de fusión.

Por último, la síntesis de HEAs en estado gaseoso se lleva a cabo al mezclar los componentes por medio de la deposición física de sus vapores elementales. Esta ruta de síntesis se usa principalmente para la obtención de películas y modificación de superficies. La deposición física de vapor de los componentes de las HEAs se lleva a cabo por diferentes métodos, al-

gunos de estos son deposición por arco catódico, haz de electrones, evaporación, láser pulsado y pulverización catódica. Hasta ahora el método más usado para fabricar películas de HEAs es la deposición por pulverización catódica. La técnica consiste en la vaporización de los átomos de un material sólido mediante el bombardeo por iones. Estos átomos se depositan aleatoriamente sobre un sustrato para formar la HEAs. Sin embargo, la nucleación y el crecimiento de aleación están limitados por parámetros como la presión y el voltaje de polarización del sustrato, o la temperatura y composición de la atmósfera.

Propiedades y aplicaciones futuras

Es importante señalar que el impacto de las aleaciones en la sociedad depende de la capacidad de estas para mejorar las condiciones de vida de los seres vivos. Aunque las HEAs están en fase de investigación su aplicación está determinada por las características y propiedades que puedan alcanzar. La mayoría de las investigaciones sobre HEAs están enfocadas en sus propiedades mecánicas, no obstante, también han mostrado potencial como barreras de difusión, materiales eléctricos, térmicos, magnéticos, catalíticos, resistencia a la corrosión, almacenamiento de hidrógeno y resistencia a la irradiación, lo que los hace materiales tecnológicamente importantes. Estas propiedades son alentadoras y prometedoras para diferentes aplicaciones funcionales tales como: componentes para máquinas resistentes a condiciones extremas de alta temperatura, componentes para centrales nucleares, revestimientos duros para moldes, materiales y herramientas de corte y desgaste, biomateriales (prótesis), estructuras marinas resistentes al agua de mar, materiales para comunicación de alta frecuencia, superconductores, termoeléctricos, eléctricos, magnéticos, catálisis, memoria de forma, almacenadores de hidrógeno y aleaciones de interconexión para celdas de combustible (ver la Figura 4) (Wang, X. et al. 2021).

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de HEAs que han superado las características y propiedades de las superaleaciones conocidas. La aleación $\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}$ forma una solución sólida con estructura cristalina cúbica centrada en las caras. Sus propiedades y características superan a algunas de las que presentan hasta ahora las superaleaciones comerciales. Por ejemplo, presenta una dureza Vic-

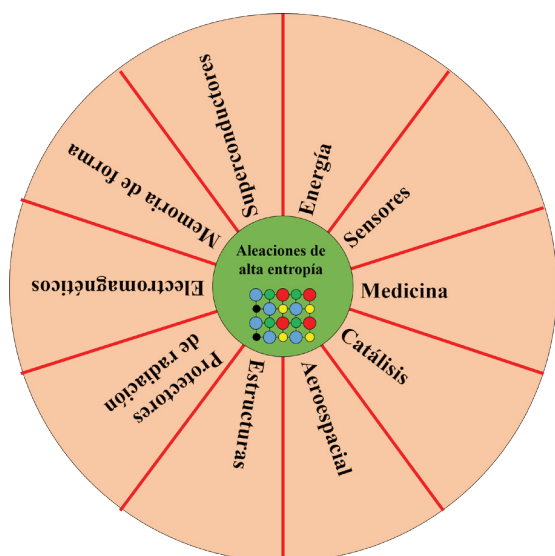


Figura 4. Áreas de oportunidad donde las aleaciones de alta entropía (HEAs) tendrán potencial aplicación en el futuro.
Fuente: Elaboración propia.

kers (HV por sus siglas en inglés, Hardness Vickers) máxima de 513 HV a baja temperatura, lo cual es muy superior a lo mostrado en la superaleación INCONEL 718 (450 HV). Además, tiene un alto desempeño a altas temperaturas (1000°C) con una dureza de 280 HV, que es aproximadamente tres veces más alta que la alcanzada por la superaleación INCONEL 718 a la misma temperatura (100 HV). Además, esta HEAs también ha superado propiedades como: resistencia al desgaste, corrosión y oxidación a altas temperaturas, en superaleación tipo Stellite 6. Por lo tanto, estas HEAs tiene potencial para sustituir fácilmente algunas superaleaciones comerciales que tienen aplicación en condiciones extremas de alta temperatura. Otra HEAs con gran potencial es la $\text{Al}_{0.5}\text{CrCoCuFeNi}$, que puede ser usada como aglutinante en carburos cementados para mejorar sus propiedades. Por ejemplo, la incorporación de un 20 % de $\text{Al}_{0.5}\text{CrCoCuFeNi}$ como aglutinante de WC muestra una dureza semejante a 700 HV que es superior al compuesto WC/Co (aproximadamente 500 HV), ambos en condiciones de alta temperatura (700°C). Por otro lado, la HEAs $\text{Al}_5\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{35}\text{Mn}_{28}\text{Ni}_{20}$ tiene excelentes propiedades de laminación que superan al acero inoxidable 304, por lo que puede ser usado como sustrato flexible para pantallas y celdas solares. Existen otros HEAs como $\text{Al}_{0.3}\text{CrFe}_{1.5}\text{MnNi}_{0.5}$, TiTaCrZrAlRu y CoCuCrFeNi que tiene futuro como recubrimientos de superficies para endurecimiento y barreras de difusión en aplicacio-

nes nucleares. Por lo tanto, no cabe duda de que eventualmente las HEAs serán aplicadas en múltiples áreas, permitiendo un enorme avance tecnológico en beneficio y bienestar de los seres vivos.

Conclusiones

Las aleaciones han sido usadas durante mucho tiempo para mejorar propiedades deseables a los materiales. Las aleaciones de alta entropía (HEAs) tienen un largo camino por recorrer, sin embargo, es evidente que su aplicación en el desarrollo tecnológico marcará un cambio importante en la civilización del siglo XXI. Aunque las HEAs están en fase de investigación y presentan márgenes de mejora ilimitado, se requiere investigación sistemática y profunda que permita desarrollar al máximo sus propiedades y características. Para que de esta forma la implementación de las HEAs en diversas áreas pueda cubrir las necesidades tecnológicas de la sociedad. Sin embargo, ya se ha reportado que las HEAs poseen propiedades excepcionales, superiores a las de las aleaciones convencionales, y es probable que en el futuro se descubran otras aleaciones sobresalientes.

Referencias

- Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375, 213-218.
- Hart, G. L., Mueller, T., Toher, C., Curtarolo, S. (2021). Machine learning for alloys. *Nature Reviews Materials*, 6(8), 730-755.
- He, K., Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1022-1039.
- Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S., Bhattacharjee, P. P. (2019). *High-entropy alloys*. Elsevier.
- Wang, X., Guo, W., Fu, Y. (2021). High-entropy alloys: emerging materials for advanced functional applications. *Journal of Materials Chemistry: A*, 9(2), 663-701.
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced engineering materials*, 6(5), 299-303.
- Zhang, C., Gao, M. C., Yeh, J. W., Liaw, P. K., Zhang, Y. (2016). *High-Entropy alloys: fundamentals and applications*. DOI: 10.1007/978-3-319-27013-5.