

LOS AVANCES DE LA METALURGIA FÍSICA

ASDRÚBAL VALENCIA GIRALDO

Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Colaboración especial para la Revista Dyna Nro. 140

INTRODUCCIÓN

Metalurgia es el arte y la ciencia de obtener los metales a partir de sus minerales y adaptarlos a las necesidades del hombre. Hay, pues, por lo menos dos grandes divisiones de la metalurgia: “la obtención de los metales a partir de sus minerales”, que es la metalurgia extractiva o metalurgia química; y “la adaptación a las necesidades del hombre”, metalurgia física o metalurgia adaptiva. En realidad esta última división comprende todos los sistemas de procesamiento de los metales, desde la fundición hasta la soldadura, por ello de un modo más restringido se considera como metalurgia física a la parte de la metalurgia adaptiva que estudia las propiedades de los metales en relación con su estructura. Se entiende por estructura todo tipo de ordenamiento interno, que va desde las dimensiones atómicas (picoestructura), pasa por la estructura cristalina (nanoestructura), la distribución de las fases y cristales (microestructura) hasta la macroestructura, producto de los procesos de fabricación.

Así pues, controlando la estructura se pueden determinar las propiedades de los metales y aleaciones; se puede ejercer control sobre la estructura por medio de procesos como la solidificación, la aleación, la deformación plástica, los tratamientos térmicos y la irradiación. Sin embargo, debe recordarse que a pesar de sus fines prácticos últimos, la metalurgia física aislada es de gran contenido teórico, es la base científica de la metalurgia adaptiva y va de la mano de la física y la ciencia de los materiales, pues estudia el metal como una sustancia, sin tener en cuenta su tamaño y su forma

(características esenciales de los procesos industriales).

La metalurgia física como disciplina reconocida apenas se inició con Sorby en 1864, pero sus orígenes se remontan mucho más atrás en el tiempo. Sorby aplicó los métodos petrográficos al acero, obtuvo fotos de la microestructura, reconoció constituyentes y creó una revolución en la metalurgia física (o metalografía como se le llamaba entonces). Otros nombres importantes en la metalurgia física del siglo XIX fueron Anosof, von Fuchs, Widmānstätten, Martens, David, Karsten, Tchernoff, Roberts-Austen, Osmond, Neuman, Swing, Rosenhain, Young, Barlow, Tredgold, Rozeboom, Gerens, Baikov, Bauschinger, Lüders, Wöhler, Kalisher, Stead, Mathiessen, van't Hoff, Gibbs, Faraday, Berthier, Mushet, Hadfield y Sauveur.

En la primera mitad del siglo XX la metalurgia física experimentó grandes avances y pueden mencionarse nombres asociados a ellos como los de Taman, Debye, Bragg, Hume-Rothery, Frenkel, Wagner, Schottky, Volmer, Wiin, Merica, Waltenberg, Scott, Guinier, Preston, Polanyi, Schmid, Boas, Orowan, Taylor, White, Strauss, Bravely, Brinell, Rockwell, Vickers, Izod, Charpy, Steinberg, Bain, Davenport, Kurdjumov, Sachs, Weler, Chalmers, Kirkendall, Darken, Zener y Hollomon, entre otros [1, 2, 3, 4].

A partir de 1950 el desarrollo ha sido tan vertiginoso que es imposible seguirle el paso en esta corta introducción. Se descubrieron materiales, procesos, instrumentos, tratamientos y técnicas, tantos y tan variados como el electrovacío, la electrónica de semiconductores y la producción de energía atómica. Todo ello ha llevado a la presente revolución de la robótica y

la informática, en que la metalurgia y los materiales son esenciales. Actualmente la metalurgia física sigue desarrollándose y en este resumen se pretende presentar los principales temas en que se trabaja en este campo a principios del siglo XXI.

LOS PRINCIPALES CAMPOS DE LA METALURGIA FÍSICA

Vista la amplia variación dimensional de la estructura de los metales, desde los picómetros hasta los metros, se entiende el espacioso alcance de la metalurgia física, la cual elucida no sólo la estructura sino también las transformaciones de ésta, y las propiedades de los materiales metálicos, por medio de la física del estado sólido y la termodinámica química. Objeto central de su estudio son los métodos experimentales. En la actualidad su campo de acción se ha extendido a la interacción con la Ciencia de los Materiales en el estudio de materiales compuestos y otras estructuras. En términos generales las principales áreas temáticas con que trata la metalurgia física son:

- Métodos experimentales para examinar los metales
- La teoría electrónica de los metales
- Cristalografía de los metales: Defectos puntuales, dislocaciones, granos, intercaras
- Difusión
- Termodinámica de sólidos: Nucleación y crecimiento, diagramas de fase, aleaciones
- Deformación plástica y fractura
- Metales líquidos y solidificación
- Sistemas de aleación
- Microestructura y fases, granos y límites de grano
- Estructura y teoría de las fases metálicas
- Transformaciones de fase difusivas en estado sólido: precipitación, eutectoides, masivas, orden-desorden, celular.
- Transformaciones de fase no difusivas: martensítica y masiva
- Endurecimiento por precipitación

- Otros mecanismos de endurecimiento: deformación, solución sólida, segundas fases, partículas, fibras
- Deformación y recocido: recuperación, recristalización y crecimiento de grano [5, 6]

Todos estos campos siguen siendo objeto de estudio, desde los metales líquidos hasta el revenido, pues una de las características de los temas que comprende la metalurgia física es que no están completamente dilucidados [7, 8, 9, 10]. Sin embargo, estas investigaciones han dado origen a materiales como los aceros de alta resistencia y baja aleación, las aleaciones con memoria de forma, los materiales inteligentes, los metales superplásticos, los vidrios metálicos, las espumas metálicas, la nanometalurgia y los aglomerados de átomos metálicos. Además muchos conceptos de la metalurgia física se han extendido a varias disciplinas relacionadas como las cerámicas, los materiales electrónicos, las multicapas y los intermetálicos. Por ejemplo, la última edición del clásico libro de Metalurgia Física de Haansen tiene el siguiente contenido: Estado líquido y amorfo; estado cuasicristalino; estado nanocristalino; evolución del orden; intermetálicos ordenados; evolución microestructural; estabilidad de fases; materiales nucleares y cerámicos. Este es un muestrario de la amplia variedad de temas que se van decantando en la metalurgia física de inicios de este milenio [11]. En este resumen se presentarán algunos de los temas mencionados, como muestra de los logros que va teniendo la metalurgia física.

METALES LÍQUIDOS

El estudio de los metales en estado líquido sigue siendo un amplio campo de investigación de la metalurgia física, tanto en la parte fundamental como en la tecnológica. Falta mucho por dilucidar en la estructura de los metales líquidos y su modelación. Un líquido se describe con el potencial de par $U(r)$, que expresa la energía de atracción intermolecular y la función de distribución radial $g(r)$, que expresa la probabilidad de que un par de átomos dados ocupen un espacio y que está relacionada con la

intensidad dispersada en un difractograma de rayos X; por ello un líquido se puede caracterizar parcialmente con $g(r)$. La visualización corriente es que, en la ausencia de una red cristalina, el metal líquido se considera un fluido de dos componentes con los iones acoplados a los cuasi libres electrones de conducción, por medio de interacciones coulombicas. Los iones se pueden tratar clásicamente como un fondo gelatinoso positivo, en tanto que el gas electrónico se puede describir con la mecánica cuántica. En contraste con los metales líquidos, los líquidos dieléctricos se pueden describir muy bien como fluidos de un componente, constituidos por esferas duras en los casos más simples [12].

El problema es que las diferencias fundamentales en la física básica de los metales líquidos y los líquidos dieléctricos no se hacen evidentes, en la masa de ambos, por difracción, sea de rayos X o de neutrones, que son los métodos comunes para determinar $g(r)$ en cada líquido. Por ejemplo, la función $g(r)$, que describe la estructura de los líquidos en el espacio real, es casi idéntica para un metal con electrones libres como el sodio y para un líquido dieléctrico simple como el argón [13].

Por la razón anterior mucha de la investigación actual se está concentrando en la comprensión de la superficie de los metales líquidos, ya que ésta presenta una oportunidad relativamente única para estudiar la diferencia entre un metal líquido y un dieléctrico puesto que las interacciones atómicas dependen fuertemente del cambio de densidad en la intercara líquido vapor solamente en el caso del metal. En efecto, la transición de la fase líquida a la de vapor corresponde a una transición desde el estado metálico (electrones cuasi libres) a un estado no metálico (electrones localizados) en el caso de los metales líquidos. En cambio en un líquido dieléctrico, el tipo de interacciones es el mismo durante la transición líquido-vapor (interacciones de van der Waals con electrones bien localizados en un solo átomo o molécula)

Aparte de esta consideración fundamental, se ha observado macroscópicamente que la tensión superficial de los metales líquidos es muchas veces un orden de magnitud mayor que la de los líquidos dieléctricos a temperaturas similares, con todas las implicaciones prácticas que esto tiene. Pero acá lo que interesa es el hecho de que una

mayor tensión superficial suprime las fluctuaciones térmicas de la superficie y permite la medida de su estructura microscópica.

Investigaciones como las anteriores están a la orden del día, un buen ejemplo es el proyecto *Surface Structure of Liquid Metal and Liquid Metal Alloy Surfaces* liderado por la Universidad de Harvard, con la colaboración de los laboratorios nacionales Brookhaven y la Universidad Bar Ilan de Israel. Para ello están experimentando con el Advanced Photon Source (APS) en el Laboratorio Nacional Argonne de los Estados Unidos [14].

En resumen, la dilucidación del estado líquido en los metales está muy lejos de estar completa y por ello es un campo tan activo de investigación, esto sin mencionar las aplicaciones prácticas y las investigaciones ligadas con la fundición y la soldadura, que están a la orden del día [15].

LOS VIDRIOS METÁLICOS

Durante los últimos veinticinco años, la tecnología de los vidrios metálicos se ha desarrollado rápidamente, tanto que en la actualidad se aplican en una serie de campos de gran utilidad. Para convertir en vidrio un metal puro se requieren velocidades de enfriamiento superiores a 10^{10} °K/s; sin embargo, las aleaciones que proporcionan vidrios metálicos de interés requieren velocidades menores, aproximadamente entre 10^5 y 10^6 °K/s. Desde el decenio de 1960 empezó la investigación de estos materiales y en 1971 se produjeron los primeros alambres largos de vidrio de paladio. Los sistemas de aleación más importantes son los formados por metales de transición (Ni, Co, Fe, Zr y La) y por los metaloides (B, C, N, Si, O). Obviamente las aleaciones férreas son las de mayor interés por su costo [16, 17, 18].

Los átomos en la estructura amorfa están distribuidos aleatoriamente, como en un líquido, en vez de estar en una red repetible y ordenada. Esta falta de estructura cristalina significa que los vidrios metálicos también carecen de defectos cristalinos como los límites de grano y las dislocaciones. Sin esos "puntos débiles", los

vidrios metálicos exhiben propiedades mecánicas extraordinarias, comportamiento magnético y resistencia a la corrosión. En general los vidrios metálicos son mucho más resistentes que sus contrapartes cristalinas (por un factor de 2 y 3), son mucho más tenaces (mucho más que los vidrios cerámicos) y tiene límites de deformación elástica elevados.

Por esas razones ciertas propiedades de los vidrios metálicos son notables, como la facilidad con que se pueden magnetizar y su muy baja resistividad eléctrica y poca expansión térmica. A bajas temperaturas ciertos vidrios metálicos se tornan superconductores y ocurren otros fenómenos electrónicos importantes. Estos materiales son apreciablemente dúctiles en tracción; algunos se pueden laminar hasta reducciones de área de 80%. Otra propiedad fundamental es su mejor resistencia a la corrosión, así como sus posibilidades como catalizadores.

Las limitaciones dimensionales de los vidrios metálicos, apenas hasta el milímetro, se deben a que las tasas de enfriamiento, como se anotó, son del orden de $10^5 - 10^6$ °K/s. Por ello sólo podían producirse como cintas y alambres, que se han usado extensivamente como núcleos de transformadores, sensores magnéticos y catalizadores, pero las pequeñas dimensiones limitan sus aplicaciones estructurales. Sin embargo, pronto se trataron térmicamente para dar aleaciones microcristalinas masivas con excelentes propiedades mecánicas. Posteriormente la investigación se ha centrado en producir vidrios metálicos masivos [19].

El reciente desarrollo de los vidrios metálicos masivos ha abierto la puerta al uso de estos fascinantes materiales en aplicaciones estructurales. Estas aleaciones requieren tasas de enfriamiento de sólo $1 - 100$ °K/s, de modo que se pueden vaciar completamente vítreos hasta espesores de un centímetro por los métodos convencionales de fundición. Aunque hay posibilidad de numerosas aplicaciones estructurales para estas aleaciones, se conoce poco sobre las propiedades mecánicas y los micromecanismos de falla [20, 21, 22].

Estos vidrios masivos se basan en aleaciones de cuatro o cinco elementos que poseen distintos tamaños atómicos lo cual hace más difícil su acomodamiento para formar estructuras

cristalinas. Ejemplos de tales aleaciones son las de Zr-Ti-Cu-Ni-Al, Zr-Ti-Ni-Cu-Be y Fe-Co-Zr-Mo-W-B [23].

Las investigaciones más recientes sobre estos materiales se enfocan a descubrir nuevas aleaciones que formen vidrios metálicos masivos y también incluyen las tareas de síntesis de materiales, procesamiento y caracterización. De este modo se están desarrollando nuevas aleaciones y técnicas novedosas en numerosos centros de investigación del mundo [24].

El otro campo en que se trabaja activamente es en el desarrollo de materiales compuestos que emplean una matriz de vidrio metálico con refuerzos cerámicos o de metales dúctiles, lo cual mejora las propiedades mecánicas de los vidrios. Se investigan procesos de fundición para producir estos compuestos con formas que requieran poco acabado. Entre ellos están los reforzados extrínsecamente con fibras y partículas y los que se crecen in situ, como las dendritas de fase beta de titanio en el vidrio masivo Vitreloy (Zr) [25, 26, 27, 28, 29].

LAS ESPUMAS METÁLICAS

Las espumas metálicas se han convertido en un atractivo campo de investigación desde del punto de vista científico y la perspectiva de las aplicaciones industriales. Las espumas metálicas sólidas tienen muchas combinaciones interesantes de propiedades físicas y mecánicas como la elevada rigidez junto con un bajo peso específico o la gran permeabilidad a los gases combinada con elevada resistencia mecánica. Por esta razón en los últimos quince años la investigación sobre estos materiales se ha extendido a todas partes [30].

Existe alguna confusión sobre el término espuma metálica, pues se usa de una manera general aunque los materiales descritos muchas veces no son espumas en el sentido estricto. Debe distinguirse entre materiales celulares, metales porosos, espumas metálicas sólidas y esponjas de metal. Los primeros se refieren a un cuerpo metálico que tenga cualquier clase de vacíos gaseosos dispersos en él. En el segundo caso los poros son generalmente redondos y aislados unos

de otros; los terceros – que interesan acá – son una clase especial de materiales celulares que se originan en una espuma metálica líquida y las esponjas metálicas se refieren a una morfología especial de metal celular con vacíos interconectados.

Los principales métodos para producir espumas metálicas son: espumado de líquidos por inyección de gas, espumado de líquidos con agentes soplantes, solidificación eutéctica de sólido-gas (gasars) y espumado de compactados de polvo.

El primer método, que se usa ampliamente para el aluminio y sus aleaciones, utiliza partículas de carburo de silicio, óxido de aluminio u óxido de magnesio, para aumentar la viscosidad, luego se inyecta un gas (aire, nitrógeno o argón) de modo que genere burbujas muy finas de gas en el seno del líquido, esta mezcla flota y se torna en una espuma líquida cuando el metal líquido se drena, la cual se deja solidificar.

La segunda manera de espumar líquidos es añadiendo un agente soplante en vez de inyectar gas, aquel se descompone con el calor y libera gas que propicia el espumado. Por ejemplo se usa calcio en aluminio para aumentar la viscosidad y luego se añade TiH_2 como agente soplante que libera hidrógeno en el líquido viscoso espumándolo.

El tercer método se aprovecha de que algunos metales líquidos forman un sistema eutéctico con el hidrógeno gaseoso. Fundiendo estos metales en una atmósfera presurizada de hidrógeno, se obtiene un baño homogéneo cargado de hidrógeno. Al enfriar se obtiene una espuma. “Gasar” es un acrónimo ruso que significa “reforzado con gas”.

Las espumas también se pueden producir a partir de polvos metálicos, en este caso se empieza por mezclar los polvos con un agente soplante, después de lo cual la mezcla se compacta para dar un producto denso semi-acabado. Luego se hace un tratamiento térmico a temperaturas cercanas al punto de fusión de los polvos, así se descompone el agente soplante y libera el gas que forma los poros, obviamente esto funciona bien no sólo con aluminio sino con otros metales y aleaciones como estaño, zinc, plomo, latón y oro.

Las principales aplicaciones de las espumas metálicas son como materiales livianos de construcción, para absorber energía, especialmente de impacto, para el control térmico y acústico. Sin embargo, todavía falta mucha investigación para optimizar nuevos productos.[31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]

METALURGIA COMPUTACIONAL Y DESARROLLO DE ALEACIONES

La metalurgia computacional es la utilización de modelos matemáticos y las herramientas informáticas para el estudio de los fenómenos metalúrgicos. Estos modelos tratan de predecir la estabilidad y equilibrio de las fases, las tasas de las reacciones o transformaciones y las relaciones estructura – propiedades. En la actualidad es un extenso campo de investigación en metalurgia física. Un ejemplo es el caso de las superaleaciones necesarias en aplicaciones como las turbinas de avión y los componentes de motores, que presentaremos más adelante

Hemos señalado que, tradicionalmente, la metalurgia ha sido una de las actividades más empíricas. Durante cientos de años se han creado y mejorado las aleaciones desde el bronce hasta el acero inoxidable explotando, en la mayoría de los casos, descubrimientos casuales hechos al mezclar metales. En las últimas décadas esta búsqueda ha sido más sistemática y con el advenimiento de la metalurgia computacional se ha desarrollado el entendimiento de cómo se cambian las propiedades de un metal aleándolo con otro [40].

Los métodos de la metalurgia computacional se pueden dividir en dos clases: aquellos que no usan ninguna cantidad obtenida empírica o experimentalmente y los que lo hacen. Los primeros se llaman métodos *ab initio* o métodos de los *primeros principios*, mientras que los otros se denominan métodos empíricos o semiempíricos. Los métodos *ab initio* son particularmente útiles en la predicción de las propiedades de nuevos materiales o de nuevas estructuras complejas, y para predecir las

tendencias en un amplio espectro de materiales. Los métodos semiempíricos son excelentes para interpolar y extrapolar a partir de propiedades conocidas [41].

Una de los principios en que se basan los métodos *ab initio* es la teoría de la densidad funcional, la cual prueba que la energía base de un sistema electrónico estable M es función solamente de la densidad electrónica $\rho(r)$. Con base en esto se plantean ecuaciones tipo Schrödinger y se predicen constantes de red, posiciones atómicas, propiedades elásticas y frecuencias de los fonones [42].

En metalurgia, sin embargo, el desarrollo de una nueva aleación con atributos particulares es todavía un reto muy grande: las candidatas son, casi siempre, demasiado numerosas para ensayarlas individualmente. Hay varias docenas de metales diferentes, y aún si las aleaciones fueran binarias, hay demasiadas combinaciones, sin olvidar que las proporciones de cada metal se pueden variar.

Por medio de la metalurgia computacional esto se puede simplificar, por ejemplo, Johannessson y sus colegas buscaron las aleaciones que mejor pudieran resistir las temperaturas elevadas y la corrosión entre las posibles combinaciones de 32 metales, con hasta cuatro metales diferentes en cada aleación. En total resultaron 192 016 aleaciones posibles. Calculando las propiedades logradas a partir de los *primeros principios*, combinaron las aleaciones promisorias para generar otras nuevas más complejas y seleccionaron la mejor de cada generación. También afinaron la búsqueda con consideraciones prácticas, por ejemplo excluyendo los metales más costosos [43].

Esta aproximación identificó varias superaleaciones que ya se utilizan (encontradas por el costoso método del ensayo y el error). También sugirió nuevas aleaciones promisorias, las cuales se pueden experimentar en vez de ensayar con toda la gama entera de posibilidades. Es decir que la metalurgia computacional puede "reducir grandemente el número de experimentos necesarios para el desarrollo de nuevas aleaciones".

Usando métodos semiempíricos los ingenieros del Marshall Space Flight Center han desarrollado una nueva aleación de alta

resistencia, de aluminio-silicio, que promete ayudar a reducir las emisiones de los motores y a mejorar el kilometraje conseguido con la misma cantidad de gasolina, tanto en automóviles y barcos, como en vehículos recreativos.

La aleación ha sido inventada por Jonathan Lee y es muy resistente al desgaste, y que exhibe una gran resistencia a temperaturas de entre 260 y 370° C. Comparativamente, cuando es probada a 315° C, es entre tres y cuatro veces más resistente que las aleaciones de aluminio convencionales y se puede producir a un precio de medio dólar por kilogramo, aproximadamente [44]. De la misma manera se están diseñando otras aleaciones, sobre todo de aluminio, magnesio y titanio.

ACEROS DE ALTA RESISTENCIA Y NUEVOS ACEROS

Un ejemplo real de las aplicaciones de la metalurgia física han sido los desarrollos de aceros resistentes, empezando por el alambre de piano cuya limitación es esa, sólo puede producirse como alambre. Mediante los mecanismos que fortalecen la martensita como el endurecimiento por solución sólida, el endurecimiento por precipitación, el endurecimiento estructural y endurecimiento por dislocaciones ha sido posible producir aceros con elevadas resistencias, como los maraging. Sin embargo, después del contenido de carbono, el mecanismo más poderosos para dar resistencia al acero ferrítico es el refinamiento de grano y esto es lo que se logra precipitando carburos y nitrocarburos en los aceros microaleados o aceros de alta resistencia y baja aleación, que han revolucionado las construcciones en acero y los cuales siguen estudiándose y perfeccionándose [45].

El número de tipos de acero no se ha duplicado desde el decenio de 1980 y la mayoría del acero que se vende es el mismo que ha estado en el mercado por décadas. Pero cuando comparamos las características de desempeño de los aceros actuales con los que se usaban a principios de la década de 1990, la proliferación de productos de acero es evidente.

La mayoría de los nuevos aceros no son nuevos tipos de acero, son productos de acero con propiedades y características que nunca se habían logrado en el pasado. Por ejemplo la empresa sueca SSAB Swedish Steel ha desarrollado un nuevo tipo de aceros de ultra alta resistencia. Los límites de rotura de los nuevos aceros laminados en frío, se hallan entre 1000 y 1400 MPa. Con estas nuevas clases de acero se pueden hacer construcciones considerablemente más ligeras y obtener nuevas soluciones sin afectar a las prestaciones.

La composición básica de los aceros no se ha variado gran cosa, lo que han cambiado son los procesos y los controles de pureza y de tratamiento térmico, es decir de la microestructura final. Una tecnología que ha contribuido grandemente a esto es la desgasificación en vacío [46].

La industria automovilística estadounidense lanzó el reto de sustituir el aluminio y los compuestos de éste con acero y planteó el programa Uitrilight Steel Auto Body (Ulsab) al cual se unieron treinta y tres grandes acerías del mundo. Los resultados han sido impresionantes y ya están aplicados en algunos modelos de automóviles [47].

Otro campo en el que se ha avanzado y se trabaja es en los aceros producidos por metalurgia de polvo y métodos similares. Partiendo de un polvo homogéneamente aleado, con la granulación adecuada, sometido a un proceso de difusión bajo presión y a temperaturas concretas, se elaboran unos aceros homogéneos, libres de segregaciones y con propiedades virtualmente isotrópicas, lo cual les confiere ventajas evidentes frente a los aceros laminados [48].

Otro proceso relacionado con el anterior es el moldeo por inyección de metal, MIM, que combina el moldeo por inyección de los plásticos con la metalurgia de polvos tradicional. Los pasos del proceso MIM son: 1- Mezclar el polvo metálico con el aglomerante orgánico; 2- Moldear como en la inyección de plásticos; 3- Remover el aglomerante por pirólisis o disolución con solventes; 4- Sinterizar y densificar hasta la densidad final. Se obtiene así un acero con propiedades controladas [49]. Estos métodos han permitido producir aceros porosos que se comportan como cualquier acero normal para moldes y pueden ser maquinados, pulidos y

erosionados. Sin embargo son porosos al aire pero no a la mayoría de los polímeros.

Esto permite que el salga del molde, en el proceso de inyección, por todas partes y no simplemente por los ventiladeros, que pueden obstruirse con el flujo plástico [50].

Antes de cerrar este resumen sobre el acero es necesario mencionar las aceros dúplex, ferrítico-austeníticos, altamente resistentes a la corrosión y de excelentes propiedades mecánicas, y los cuales continúan mejorándose [51].

ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

El cambio de forma con el calentamiento no es una cualidad especial de los materiales pero el cambio a una forma específica sí lo es. Por ejemplo, el acero experimenta deformaciones cuando se calienta, pero no asume una forma particular, de otro lado una aleación con memoria de forma si cambia directamente a una forma inherente, además el cambio es varios órdenes de magnitud mayor que en el acero.

El cambio en la forma se debe a una transformación martensítica termoelástica, cuyos detalles completos escapan a este resumen, pero que se puede visualizar en la figura 1, aunque la transformación es sin difusión y extremadamente rápida la frecuencia del sistema está limitada por la inercia del calentamiento y el enfriamiento. Aunque las aplicaciones bidireccionales son posibles luego de entrenar el material, estas aleaciones están mejor adecuadas a las tareas en una sola vía, como el posicionamiento y el despliegue de dispositivos, como una antena en el espacio por ejemplo. En todo caso solo pueden usarse en aplicaciones de baja frecuencia y baja precisión. La fatiga térmica también es problema, por ello estos materiales tienen pocas aplicaciones en el control de vibraciones.

Los materiales más comunes usados en estructuras adaptativas son las aleaciones con memoria de forma, la más comercial es el Nitinol, o níquel y titanio combinados. Menos populares pero utilizables son las de oro cadmio, plata cadmio, Cu-Al-Ni, cobre estaño, cobre zinc y Cu-Zn-Al.

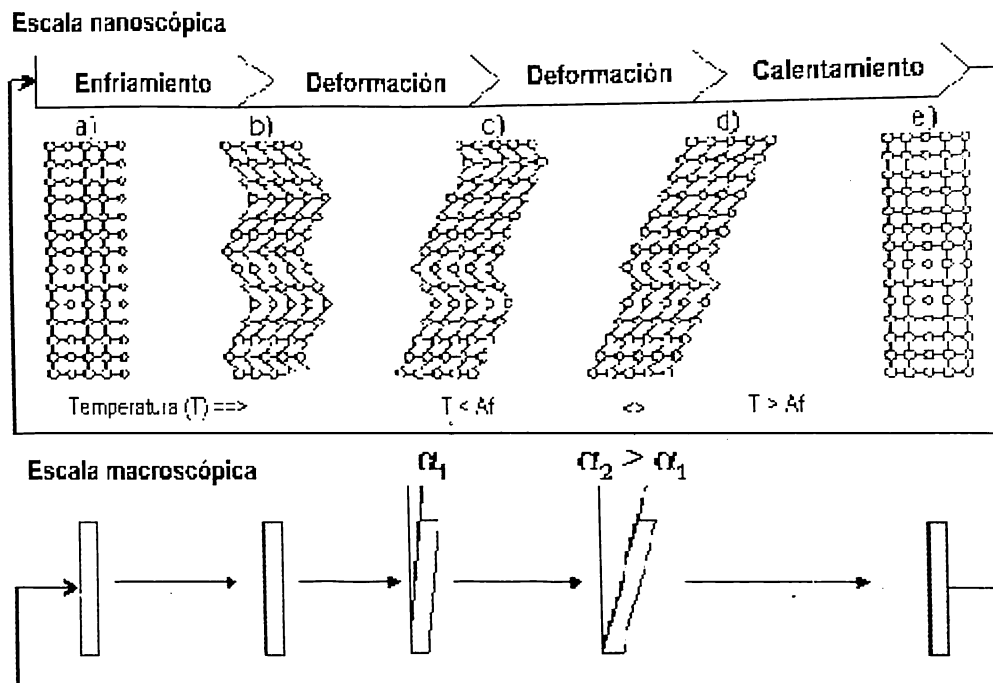


Figura 1. Ilustración del efecto de memoria de forma: la estructura cristalina del monocristal original en (a); luego de enfriarla hasta la temperatura de transformación total (M_f) se transforma en martensita sin cambio significativo en las dimensiones externas (b); luego de la deformación mecánica (c y d) el sistema minimiza la energía por medio de maclado (cizallamiento invariante de la red) mientras se conservan los enlaces atómicos; el calentamiento por encima de la temperatura de transformación total a austenita (A_f) revierte la fase madre a la orientación original (e).

MATERIALES INTELIGENTES

Entre los materiales metálicos que forman parte de los llamados materiales inteligentes, usados en las estructuras adaptativas, además de las aleaciones con memoria de forma se encuentran los materiales magnetostrictivos y las aleaciones con memoria de forma magnética [52, 53].

Magnetostricción

El fenómeno de la magnetostricción es el cambio en la forma o tamaño de un material ferroeléctrico, inducido por un campo magnético. Es causado por el movimiento de los límites de los dominios magnéticos, asociados con la magnetización. La magnetostricción es una causa de la vibración en los transformadores, pero

también se usa para producir ultrasonido en un oscilador de magnetostricción haciendo que un ferromagneto oscile, a una frecuencia escogida, aplicándole un campo magnético.

También se ha observado que la deformación mecánica aplicada produce alguna anisotropía magnética. Así pues, los materiales magnetostrictivos tienen la habilidad de convertir energía magnética en energía mecánica y viceversa, esto permite usarlos como actuadores o sensores.

Una de las primeras aplicaciones prácticas fue en el SONAR durante la segunda guerra mundial. Otra fue en los sensores de torque. Los materiales basados en níquel, usados entonces, tienen unas deformaciones muy pequeñas. En 1960 el terbio (Tb) y el dysprosio (Dy) se encontró que exhibían entre 100 y 10,000 veces las deformaciones magnetostrictivas de las aleaciones de níquel, pero esto sólo ocurría a temperaturas elevadas.

Se buscaba un material que, aunque operara a temperaturas elevadas, tuviera una deformación grande y requiriera un campo magnético de baja intensidad. Se encontró que la adición de *Tb* y *Dy* para formar los compuestos $TbFe_2$ y $DyFe_2$ llevaban las propiedades magnetostrictivas a temperatura ambiente. Estos materiales requerían campos magnéticos grandes para generar deformaciones grandes. Aleando los dos compuestos se encontró que el campo magnético necesario se reducía considerablemente. La aleación resultante, $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ (conocida comercialmente como Terfenol-D) es el material magnetostrictivo más usado en la actualidad [54].

Las aleaciones con memoria de forma magnética (MFM)

Ciertos materiales con memoria de forma, que también son ferromagnéticos, pueden exhibir

grandes cambios dimensionales cuando se aplica un campo magnético. Estas deformaciones ocurren en la fase de baja temperatura (martensítica). Este efecto se observó por primera vez en la fase martensítica tetragonal del compuesto intermetálico de Heusler, Ni_2MnGa , Figura 2, donde se produjeron deformaciones de 0.19% con campos de 0.8 Tesla a 265° K. Estas grandes deformaciones inducidas magnéticamente (comparables a las observadas en Terfenol-D) están asociadas con el movimiento de los límites de macla en la fase martensítica bajo el impulso del cambio en la energía de Zeeman, $M.H$, a través de los límites de macla. Esta combinación de memoria de forma y cambio dimensional hace que estos materiales, descubiertos en 1996, sean de los más promisorios en el campo de los dispositivos adaptativos.

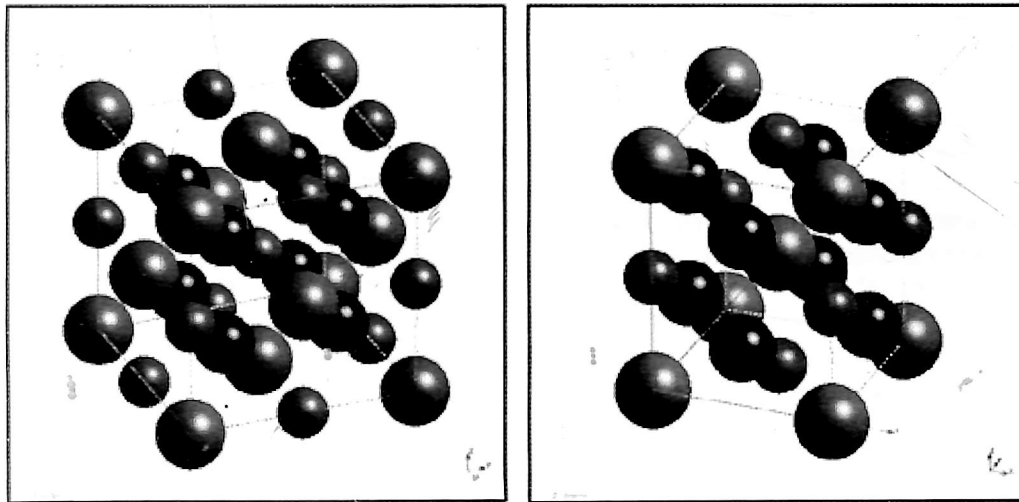


Figura 2. (a) Estructura de Heusler Ni_2MnGa ; (b) Fase tetragonal de la misma composición, estable por debajo de la temperatura de transformación martensítica (M_f) cercana a 0° C [55].

METALES SUPERPLÁSTICOS

Los materiales superplásticos son sólidos policristalinos que tienen la capacidad de sufrir grandes deformaciones sin que aparezca en la región extendida la inestabilidad plástica o sea el

cuello o estricción. Algunos metales pueden alcanzar deformaciones hasta de 8000% sin romperse, es decir que se pueden estirar hasta alcanzar 80 veces su longitud inicial. Un alargamiento de más del 200% en tracción indica comportamiento superplástico. Los mayores alargamientos reportados son de 7750% en una

aleación eutéctica de Pb-Sn y más de 8000% para una aleación B-Al [56].

Aunque este fenómeno es conocido hace ya muchos años, la primera noticia apareció en 1912, y se conocen ya cientos de aleaciones que exhiben comportamiento superplástico queda mucho por avanzar en la explicación de los mecanismos que lo originan.

Para desplegar comportamiento superplástico un material debe tener grano fino, con diámetro inferior a 5 μm , debe deformarse a temperatura elevada a una tasa muy lenta de deformación y los granos deben tener posibilidad de deslizarse unos sobre otros y rotar cuando se aplica la tensión.

Se han avanzado muchas hipótesis sobre el micromecanismo de la superplasticidad en los materiales de grano fino, pero no se ha encontrado ninguna que pueda describir con precisión la mecánica y la microestructura de la fractura en la deformación superplástica. Muchas teorías han desarrollado modelos que son capaces de predecir las características mecánicas y topológicas de la deformación superplástica. Se han propuesto diferentes mecanismos sobre la recuperación controlada del flujo de dislocaciones, donde se acepta que la tasa que controla el proceso es el ascenso de aquellas. Sin embargo, en este campo falta mucho por dilucidar y por ello continúa siendo un campo activo de investigación en la metalurgia física [57].

NANOMETALURGIA:

LOS CONGLOMERADOS DE ÁTOMOS METÁLICOS

Los conglomerados de átomos metálicos conocidos como *metal clusters* constituyen un estado intermedio de la materia entre los átomos libres y los sólidos masivos. Tales nanopartículas, con sus reducidas dimensiones y alta relación superficie / volumen, tienen propiedades estructurales y electrónicas únicas, que dependen marcadamente del tamaño [58].

En cierto sentido los conglomerados de átomos metálicos son el puente entre el macrocosmos y el nanocosmos, pero fuera del

interés por su estabilidad, el número de átomos que los constituyen y su forma, las aplicaciones prácticas incluyen su uso como catalizadores y como constituyentes promisorios en la nanoelectrónica.

Una característica fundamental de los conglomerados de átomos metálicos es que ciertos tamaños ocurren preferencialmente, por ejemplo, en el sodio los conglomerados con 8, 20, 40 o 58 átomos son mucho más abundantes que otros tamaños. Estos conglomerados predominan porque, por alguna razón, son excepcionalmente estables. La secuencia de estabilidad continúa con 92, 138, 198, 264, 442, 554 y números mayores. Los conglomerados de sodio, y otros metales, con estos números de átomos permanecen estables aun cuando estén tan calientes que no pueden solidificar y permanecen sólo como gotitas de líquido [59].

Esta tendencia a formar exactamente ciertos tamaños, es explicada por la mecánica cuántica, sin embargo todavía queda mucho por explicar sobre cómo y cuándo ocurre la transición de conglomerado a sólido o líquido masivo, además de cuestiones fundamentales sobre sus propiedades y aplicaciones, razones por las cuales este campo de investigación es bastante activo [60, 61].

Aunque no sirva como regalo de aniversario, una cadena de oro construida átomo a átomo puede servirnos aún para responder a una de las preguntas básicas de la nanotecnología. ¿Hasta dónde podemos llegar en el mundo de lo pequeño? Wilson Ho, y sus colegas de la University of California en Irvine han descubierto la fase molecular a partir de la cual un grupo de átomos se convierte en una estructura sólida concreta, un hallazgo que podría tener un impacto importante en el futuro desarrollo de estructuras metálicas construidas a escala molecular. El estudio, el primero en su género, sugiere también que existe un límite de tamaño mínimo en la construcción de moléculas eléctricamente conductoras.

La investigación, según Ho, responde a cuestiones fundamentales sobre cómo los sólidos se forman a partir del ensamblaje de átomos individuales. Nos ha permitido ver la materia formándose en su unidad más pequeña, lo cual tendrá implicaciones en la elaboración de nanoestructuras metálicas que puedan utilizarse

en diversos campos, como el almacenamiento de datos, circuitos electrónicos, etc.

Ho y su grupo utilizaron un microscopio STM (scanning tunneling microscope) para construir una cadena de átomos de oro, con el objetivo de medir cómo los estados electrónicos variaban a medida que se añadían más átomos a la cadena. Empezando con un único átomo y añadiendo otros sucesivamente, uno a uno, pudieron medir la conductividad eléctrica en tales estados, ver cómo compartían electrones, y comprobar cómo tales medidas cambiaban dramáticamente durante la adición de átomos a la cadena. El STM permitió no sólo manipular átomos individuales sino también fotografiar la cadena y medir sus propiedades. Obtuvieron así una clara conexión entre la geometría de la nanoestructura fabricada y sus propiedades electrónicas.

Cuando añadieron el quinto y el sexto átomo, sin embargo, la cadena empezó a exhibir las propiedades colectivas de una estructura global, cuando sus átomos pierden sus características individuales para asumir las de toda la estructura. Es en este punto cuando una molécula metálica se hace conductora y puede ser utilizada para conducir electricidad.

La cadena de átomos de oro alcanzó la cifra de 20 átomos, aunque en principio no hay un límite a la longitud que podría adoptar. Desde los 6 a los 20 átomos, las mediciones de los estados para los electrones mostraron sólo pocas variaciones, convergiendo hasta obtener las propiedades típicas de los sólidos con un mayor número de átomos. Según este experimento, una estructura de oro funcional podría fabricarse con sólo seis átomos.

Efectivamente, Ho y sus colegas han respondido a la pregunta de cuántos átomos son necesarios para construir un material que tenga una utilidad potencial. No es práctico producir en masa cadenas de este tipo como conductores unidimensionales, catalizadores o sistemas de almacenamiento de datos, pero los estudios proporcionan la base científica para la futura nanotecnología, ya que contribuyen a nuestra comprensión del comportamiento de la materia en función de su tamaño" [62].

COMPUESTOS INTERMETÁLICOS ORDENADOS

Los metales forman soluciones sólidas intermedias, las cuales pueden tener estructuras muy diferentes a las de los constituyentes. Estas fases intermedias, se pueden extender en intervalos amplios de composición. Cuando están restringidas a un intervalo estrecho de composición, cercano a una relación estequiométrica simple como AB , A_3B , AB_2 , etc., se les denomina compuestos intermetálicos. En cualquier caso, la mayoría de las fases intermedias poseen estructuras cristalinas que son diferentes a las de cualquiera de los elementos componentes. En muchos sistemas metálicos las fases intermedias se forman también a composiciones que requieren fórmulas extrañas, por ejemplo Cu_5Si , Fe_5Zn_{21} o KHg_{10} .

El papel de las fase intermedias en tecnología es muy importante, su empleo como principales constituyentes de las aleaciones puede impartir propiedades únicas a materiales especializados para crisoles, turbinas, herramientas, diodos, conductores, superconductores, imanes, etc. y si se usan como constituyentes menores juegan papel importante en muchas aleaciones comerciales como aceros, duraluminios, materiales resistentes al desgaste, imanes, hojas de rotores, etc. para mencionar sólo unos pocos. Las fases de intervalo de composición estrecho, los compuestos intermetálicos, son los que más pueden actuar como constituyentes finos y dispersos que aumentan la resistencia de la aleación.

La clasificación más común de las fases intermedias es en tipos estructurales similares (fases isomorfas) o grupos en los cuales parece predominar un determinado tipo de enlace. Así se puede hablar de compuestos normales de valencia, fases electrónicas, fases de Laves, fases tipo Ni-As, compuestos de coordinación, fases intersticiales, estructuras compactas, etc.

La designación cristalina de las estructuras comunes se hace en una publicación: Strukturbericht. La estructura *fcc* se denomina A1, la *bcc* A2, la *hcp* A3, la del diamante A4, etc.

Normalmente las fases y compuestos se denominan con letras griegas, latinas o fórmulas, por ejemplo latón γ , Cu_5Zn_8 o D8_2 .

Un tipo de fases intermedias son las fases electrónicas, que se forman con enlace metálico entre elementos que tienen aproximadamente los mismos tamaños atómicos y poseen electronegatividades similares. Se llaman electrónicas porque se forman con proporciones precisas entre electrones de valencia y los átomos, tal es el caso del NiAl , que tiene una relación $e/a = 3/2$.

Los compuestos intermetálicos a que nos queremos referir en esta reseña tienen composiciones como Ni_3Al , FeCo , Ti_3Al , TiAl , Cu_3Au , Ti_5Si_3 , Ni_2AlTi , Ti_2AlNb ; algunos son "compuestos de línea" porque se representan con una línea, en el diagrama de fases, otros pueden alejarse considerablemente de sus composiciones ideales. Una característica común que tienen es que son atómicamente ordenados, porque el enlace entre átomos distintos es más fuerte que entre los iguales, por eso constituyen una clase especial de materiales metálicos que forman estructuras cristalinas con orden de largo alcance como se ve en la figura 1. Algunos intermetálicos se pueden desordenar calentando por encima de la temperatura crítica pero esto sólo es posible en los compuestos de orden débil, como Cu_3Au ; en ingeniería interesan los intermetálicos que están fuertemente ordenados por debajo de la temperatura crítica, T_c [63].

Algunos materiales de esta clase, con $T_c < 700^\circ\text{C}$, despertaron interés por sus raras estructuras de dislocaciones y comportamiento mecánico asociados con las redes ordenadas. En la figura 2 se observan los aluminuros de Ni . La deformación en las aleaciones ordenadas está controlada por el deslizamiento fácil de dislocaciones de superred o apareadas, la movilidad relativamente baja de estas dislocaciones a temperaturas elevadas origina un comportamiento de cedencia anómalo; esto es, la resistencia a la cedencia aumenta con la temperatura de ensayo. Esto se observó en muchos compuestos intermetálicos ordenados como Ni_3Al y Cu_3Au es notable en los aluminuros de titanio.

La investigación reciente se ha centrado en estos materiales porque exhiben prometedoras propiedades a temperatura elevada, debido a que el orden de largo alcance de la superred disminuye la movilidad de las dislocaciones y los procesos de difusión a temperaturas elevadas. Sin embargo, debido a sus problemas de fragilidad tales compuestos intermetálicos se han usado principalmente como refuerzos en materiales estructurales, como es el caso de las superaleaciones de Níquel.

En la actualidad los compuestos intermetálicos importantes son aluminuros: NiAl , Ni_3Al , FeAl , Fe_3Al , TiAl , Ti_3Al , Ti_2AlNb , todos ellos, exceptuando Fe_3Al y Ti_3Al permanecen ordenados hasta el punto de fusión. Aunque la principal razón por el gran interés en ellos es su alta resistencia a temperatura elevada, por ejemplo el Nb_3Al también se usa por sus propiedades superconductoras [64, 65].

Un aspecto negativo de estos aluminuros, además de su baja ductilidad a temperatura ambiente, es su resistencia a la oxidación, que es menor que la deseable a temperaturas elevadas. Estos aluminuros se caracterizan por una fuerte tendencia a formar TiO_2 en vez de Al_2O_3 , a alta temperatura. Por ello las investigaciones se han encaminado a mejorar este fenómeno sin detrimento de sus propiedades mecánicas a temperatura elevada. Los aluminuros de titanio sobre los que se trabaja son el Ti_3Al , que tiene estructura ordenada D0_{19} y son las aleaciones llamadas alfa 2 y el TiAl con estructura L1_0 es llamado aluminuro gamma. La investigación en estos campos es activa [66, 67, 68].

CONCLUSIÓN

En este apretado resumen se ha pretendido dar una visión de los múltiples temas que son centrales a la investigación actual de la metalurgia física: Es posible que algunos de ellos sean muy conocidos y hayan faltado otros – como los metales multicapas, los compuestos in situ, la nueva visión de las transformaciones y las nuevas herramientas e instrumentos de análisis– pero las

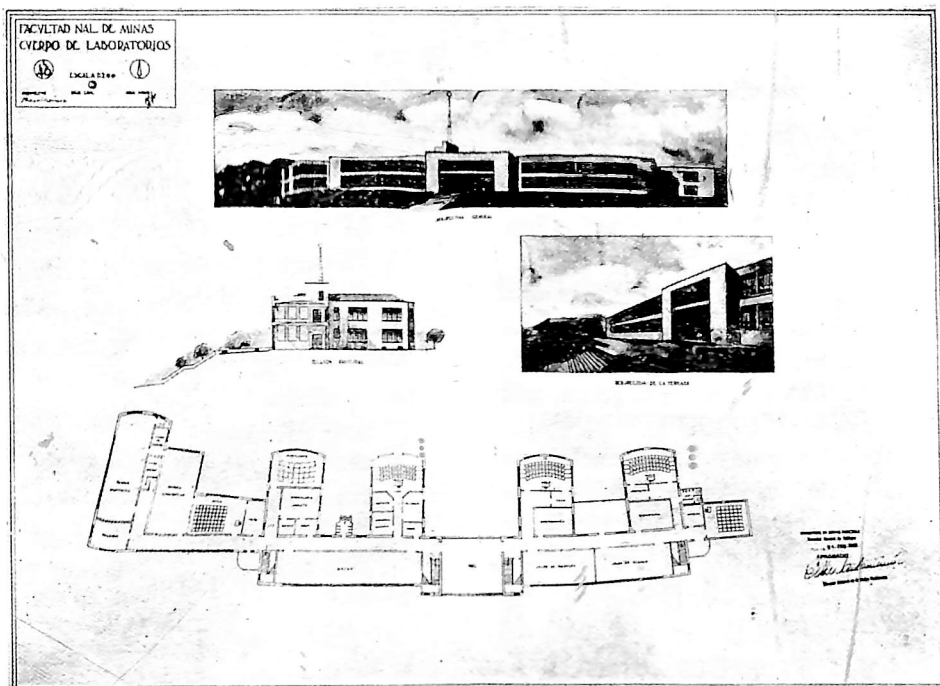
inclinaciones personales y las limitaciones de espacio son las únicas razones para la presente selección de tópicos.

REFERENCIAS

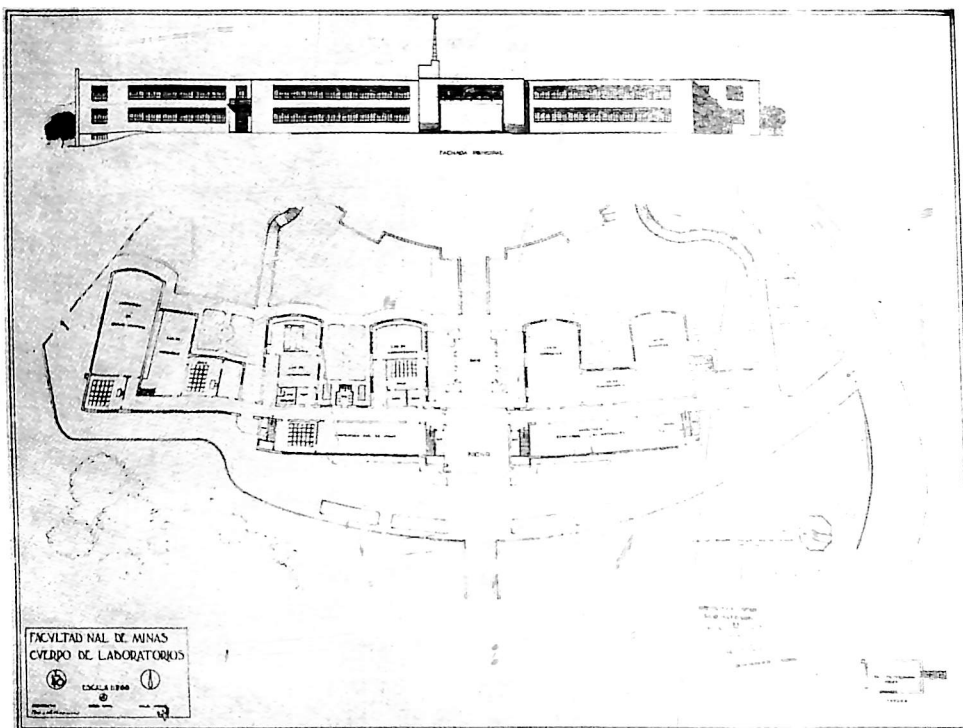
1. Valencia, A., *Metalurgia Física*, Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, 1987
2. Mehl, F., "The Historical Development of Physical Metallurgy", *Physical Metallurgy*. John Wiley, New York, p. 1, 1965.
3. Spretnak, "Chronology of Metals and Metalworking", *Technical Notes on Forging*, FIERF, Cleveland, p. 2, 1977.
4. Sullivan, W., *The Story of Metals*, ASM, Cleveland, 1960.
5. Banerjee, S. and Ramanujan R., *Advances in Physical Metallurgy*, Taylor and Francis, New York, 1996.
6. Charles, J. and Smith, G. *Advances in Physical Metallurgy*, The Institute of Metals, London, 1990.
7. Bacon, D. and Vitek, V., "Atomic- Scale Modelling of Dislocations and Related Properties in Hexagonal- Close Packed Metals", *Met. Material Trans.*, Vol 33 A, p. 421, 2001.
8. Brener, E. and Temkin D., "Theory of discontinuous precipitation: importance of the elastic strain", *Acta Materialia*, 2, (5), 2003.
9. Massalski, T., "Massive Transformation Revisited", *Met. Mat. Trans.*, 8, (33A), p. 2251, 2002.
10. Gusak, A. And Tu, K. "Theory of Normal Grain Growth in Normalized Size Space", *Acta Materialia*, 13, (51), p. 3895, 2003.
11. Haasen, P. and Mordike, B. *Physical Metallurgy*, 3rd Edition, John Wiley, New York, 1996.
12. Valencia, A. *Notas sobre termodinámica metalúrgica*, Universidad de Antioquia, Medellín, 1984.
13. Norman H., *Liquid Metals Concepts and Theory*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
14. <http://www.hutrough.harvard.edu/oleg/metals.html>, 2003
15. Pehlke, R. "Computer Simulation of Solidification Process- The Evolution of Technology", *Met. Mat. Trans.*, 8, (33A), p. 2251, 2002.
16. Klemen, W. et al. "Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys", *Nature*, vol 1987, p. 869 1960.
17. Polk, D. and Turnbull, D. "Flow of melt and glass forms of metallic alloys", *Acta Metal*, vol. 20, p. 493, 1972.
18. Valencia, A. "Los vidrios metálicos", *Apéndice 1, Transformaciones de Fase en Metalurgia*, p. 393, Ed. Universidad de Antioquia, Medellín, 1998.
19. Ray, R., Bulk microcrystalline alloys from metallic glasses, *Metal Progress*, p. 29, 1981.
20. Molokanov, V. et al. "The effect of temperature of melt at quenching on glass formation and crystallization of $\text{Fe}_{61}\text{Co}_7\text{Zr}_{10}\text{Mo}_5\text{W}_2\text{B}_{15}$ bulk metallic glass forming alloy". *Materials Science Transactions*, 1, p. 42, 2002.
21. Flores, K. and Dauskardt, R., "Mean Stress Effects on Flow Localization and Failure in a Bulk Metallic Glass", *Acta Mater.* (49), p. 2527, 2001.
22. Flores, K. M., et al., "Flow and Fracture of Bulk Metallic Glass Alloys and their Composites", *Mater. Trans. JIM*, (42), p. 619, 2001.
23. http://easy.stanford.edu/dauskardt/kathy_flores/BMG/bmg.html, 2003.
24. <http://www.mrs.org/publications/jmr/jmra/2002/jun/031.html>, 2003.
25. <http://www.cco.caltech.edu/~vitreylo/composites.htm>, 2003.
26. <http://www.cco.caltech.edu/~vitreylo/development.htm>, 2003.
27. <http://www.cco.caltech.edu/~vitreylo/characterization.html>, 2003.
28. Zhang, T. et al. "Thermal and Mechanical Properties of Cu-Based Cu-Zr-Ti-Y Bulk Glassy Alloys", *Materials Transactions*, 10, (42), 2001.
29. Moorjani, K. *Magnetic glasses*, Elsevier, New York, 1984.
30. Banhart, J., "Metallic foams: challenges and opportunities", *Eurofoam (2000) Proceedings*, P. Zitta, J.Banhart and G. Verbist (eds.), MIT-Verlag, Bremen, 2001.

31. Cox, S. et al. "Metallic foam processing from the liquid state. The competition between solidification and drainage", *Eur. Phys. J. AP* 14, p. 87.
32. Weaire, D. et al. "The Fluid Dynamics of Foams". *J. Phys.: Condens. Matter*, (15), p. S65, 2003.
33. Cox, S. and Fortes, M. "Properties of three-dimensional bubbles of constant mean curvature". *Phil. Mag. Letts*, (83), 2003.
34. Cox, S. et al. "Topological changes in a two-dimensional foam cluster". *Euro. Phys. J. E*, Vol 11, p. 29, 2003.
35. Banhart, J. et al. (Eds.), *MetFoam 2001, Proceedings of the International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology*. MIT-Verlag, Bremen, 2001.
36. Weaire, D. et al., "Methods and models of metallic foam fabrication", *Proc. 8th Ann. Intl. Conf. Composites Engng.*, D. Hui (Ed.), Tenerife, p. 977, 2001.
37. Chen, C. et al., The mode I crack growth resistance of metallic foams, *J. of Mechanics and Physics of Solids*, (49), p. 231, 2001.
38. Wu, Z. and He, D. "Changes in porosity of foamed aluminium during solidification", *Chinese Science Bulletin*, (45), Sept. 2000.
39. Hhart J. <http://www.metalfoam.de/papers/banhart00b.pdf>, 2003.
40. Franceschetti, A. and Zunger, A. "The inverse band structure problem of finding an atomic configuration with given electronic properties", *Nature*, (402), p. 60, 1999.
41. Ceder, G. et al, "Identification of cathode materials for lithium batteries guided by first principles calculations", *Nature*, Vol. 392, 16 april, p. 694, 1998.
42. Bernholc, J. "computacional Mat. Science: The Era of Applied Quantum Mechanics", *Physics Today*, Sept. p. 30, 1999.
43. Johannesson, G. et al. "Combined electronic structure and evolutionary search approach to materials design". *Physical Review Letters*, 25, (88), p. 255506-1, 2002.
44. *Noticias de la Ciencia y la Tecnología*. No. 232, 2 de agosto, 2002.
45. Honeycombe, R and Badeshia, H. *Steels: Microstructure and Properties*, Edward Arnold, London, 2nd ed., 1995.
46. Vanaparthi, N. and Srinivasan, M. "Modelling of solidification structure of continuous cast steel", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, (6), p. 237, 1998.
47. Sundaman, A. and Agren, J. "Computer applications in the development of steels". *MRS Bulletin*, April, p. 32, 1999.
48. Makover, H., "Aceros pulvimetalúrgicos de alto rendimiento", *Informetal*, No. 53, Agosto, p. 59, 2003.
49. Ji, C. et al., "Sintering study of 316L stainless steel metal injection holding parts using Taguchi method: final density", *Materials Science and Engineering A311*, p. 74, 2001.
50. [http://www.carrs-tool.co.uk/publications/](http://www.carrs-tool.co.uk/publications/Porcerax.htm) Porcerax.htm, 2003.
51. Sanvik S., *Duplex Satinless Steel for Implants*, Sandviken, Sweden, 1998.
52. Valencia, A., "Los materiales inteligentes", *Informetal*, No 53, Ag., p. 19, 2003.
53. Valencia A. El próximo avance en la ingeniería: los materiales y las estructuras adaptativas", *Revista Facultad de Ingeniería-U. de A.*, No 29, Junio, p. 125.
54. Magnetostriction/magnetostriction.html, 2003
55. O'Handley, R. and Allen, S. "Ferromagnetic shape memory materials," in: *Encyclopedia of Smart Materials*, Sons. New York., 2001.
56. Arteaga, A. "Superplasticidad", *Curso Comportamiento Mecánico de los Materiales*. Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, 2002.
57. Saito, T. et al., Multifunctional alloys obtained via a dislocation-free plastic deformation mechanism, *Science*, (300), p. 464, 2003.
58. Cohen, M. and Knigh, W. "Physics of Metal Clusters", *Physics Today*, 12, (43), Dec., p. 42, 1990.
59. Brack, M. "Metal Clusters and Magic Numbers", *Scientific American*, (283), December, p. 30, 2000.
60. Joshi, K. and Kanhere, D. "Thermodynamics of tin clusters", *Physical Review B*, 23, (67), Third Series, June, p. 235413, 2003.
61. Natajaran, R. and Ögüt, S. "Structural and electronic properties of Ge-Te clusters", *Physical Review B*, 23, (67), Third Series, 23, Jun., p. 235326, 2003.
62. <http://www.amazings.com/ciencia/index.html> Oro y Nanotecnología, 9 de Sept. de 2002.

63. Valencia, A., *Transformaciones de Fase en Metalurgia*, Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, 1998.
64. Cahn, R. "The use of intermetallics in engineering design", *Rev. R. Acad Cien. Exact. Fis. Nat.*, 2, (90), p. 77.
65. Froes, F. And Suryanarayana, C. "Titanium Aluminides", *Physical Metallurgy and Processing of Intermetallic Compounds*, N.S. Stoloff and V. K. Sikka (eds.), Chapman and Hall, New York, p. 297, 1996.
66. Valencia, A. "Los compuestos intermetálicos como materiales de ingeniería", *Memorias Semana Técnica Nacional de Ingeniería de Materiales y Metalúrgica, Los materiales para construir el mundo*, Cali, 1999.
67. Lin R.Y., *Design Fundamentals of High Temperature Composites, Intermetallics, and Metal-Ceramics Systems*, TMS Process Fundamental Committee, Metals and Materials Society Thermodynamics and Phase Equilibrium, Minerals, Nihon Kinzoku Gakkai, Metals and Materials Society Meeting, 1996 Anaheim, Calif., John Wiley, New York, 1998.
68. *Ordered Intermetallics - Physical Metallurgy and Mechanical Behaviour: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop*, Irsee, Germany, June 23-28, 1991, C. T. Liu, R. W. Cahn, G. Sauthoff (Editors), Kluwer Academic Publishers, 1992.



Ante proyecto de la Facultad Nacional de Minas
Planta alta y perspectivas del cuerpo de laboratorios



Ante proyecto de la Facultad Nacional de Minas
Fachada y Planta baja del cuerpo de laboratorios