



Artículo de Investigación

# Explorando la transformación martensítica en el sistema Cu-Al

## Exploring the martensitic transformation in the Cu-Al system

### RESUMEN

La transformación martensítica en el sistema Cu-Al ha sido estudiada principalmente en el contexto de aleaciones con memoria de forma, donde su capacidad para recuperar la forma original tras la deformación tiene aplicaciones en actuadores y dispositivos médicos. Las aleaciones de Cu-Al, con un contenido de aluminio entre 9% y 14%, experimentan un cambio de microestructura al enfriarse rápidamente desde la fase  $\beta$  de alta temperatura. En ciertos casos, como en composiciones eutectoides, se ha reportado que, para algunos tratamientos térmicos, la perlita en este sistema presenta mayor dureza que la martensita, lo que abre una interesante vía para futuros estudios. Continuar investigando la determinación precisa de la temperatura  $Ms$  y/o  $As$ , junto con la energía libre asociada a esta transformación, permitiría predecir mejor el comportamiento de las aleaciones Cu-Al y expandir su aplicación en diversos campos más allá de las aleaciones con memoria de forma.

**Palabras clave:** Transformación martensítica;  $Ms$ ; Cu-Al; Memoria de forma

### ABSTRACT

The martensitic transformation in the Cu-Al system has been studied primarily in the context of shape memory alloys, where its ability to recover its original shape after deformation finds applications in actuators and medical devices. Cu-Al alloys, with an aluminum content between 9% and 14%, undergo a microstructural change when rapidly cooled from the high-temperature  $\beta$  phase. In certain cases, such as eutectoid compositions, it has been reported that, for some heat treatments, pearlite in this system exhibits greater hardness than martensite, opening an interesting avenue for further studies. Continuing to investigate the precise determination of the  $Ms$  and/or  $As$  temperature, along with the free energy associated with this transformation, would allow for better prediction of Cu-Al alloy behavior and expand their application in various fields beyond shape memory alloys.

**Keywords:** Martensitic transformation;  $Ms$ ; Cu-Al; Shape memory.

#### Autor de Correspondencia

**Luciano Figueroa Maturana**  
oscar.bustos@usach.cl  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

**Luciano Figueroa Maturana**  
**Oscar Bustos Castillo**  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 2 de agosto, 2024  
Artículo Aceptado: 10 de octubre, 2024  
Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



## Introducción

Las aleaciones de cobre y aluminio (Cu-Al) se han convertido en un campo de estudio esencial dentro de la ciencia e ingeniería de materiales debido a su combinación de propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y capacidad para experimentar transformaciones de fase que pueden ser provechosas en aplicaciones avanzadas. Estas aleaciones, suelen contener un porcentaje en peso de 6% a 14% de aluminio, donde destacan las composiciones con un porcentaje entre 8% a 11%, que son especialmente valoradas por sus aplicaciones en componentes estructurales y marinos.

Dentro de las transformaciones de fase que se presentan en este sistema, la transformación martensítica es de gran interés. Esta ocurre en aleaciones con un contenido de aluminio entre 9% y 14% y se caracteriza por un cambio en la microestructura cuando la aleación es enfriada rápidamente desde la fase beta de alta temperatura. Este proceso da lugar a una microestructura que tiene la capacidad de recuperar su forma original después de una deformación, un fenómeno conocido como efecto memoria de forma.

El efecto memoria de forma es un comportamiento en el cual una aleación, tras haber sido deformada, puede volver a su configuración original al ser calentada por encima de una cierta temperatura. Este fenómeno es aprovechado en una amplia gama de aplicaciones, particularmente en la fabricación de actuadores y sensores, donde la precisión y la capacidad de recuperación son críticas. A su vez, las aleaciones Cu-Al con memoria de forma han encontrado aplicaciones en el campo médico, como en la fabricación de stents, donde la capacidad de expansión controlada dentro del cuerpo humano es esencial.

## Sobre las aleaciones Cobre-Aluminio

En términos generales, el diagrama de fases Cu-Al como se muestra en la Figura N° 1 es similar al del sistema Cu-Zn. Existe cierto porcentaje de solubilidad de Al en Cu y varios compuestos intermetálicos que se forman a mayores contenidos de aluminio, algunos de los cuales tienen la misma estructura cristalina y

estequiometría que los del sistema Cu-Zn. Sin embargo, hay una diferencia significativa en el tamaño atómico, por lo que el efecto endurecedor producto de la distorsión de la red cristalina por parte del aluminio es mayor. Comúnmente hay dos aleaciones comerciales de Cu-Al (5% y 8%Al) que son soluciones sólidas, cuyos tratamientos térmicos solo implican la homogenización convencional de la estructura fundida y el recocido de la estructura trabajada en frío. Cabe destacar que las aleaciones con contenidos de aluminio por encima del 8% están sujetas a la formación de  $\beta$  a alta temperatura, que al enfriarse lentamente da paso a una reacción eutectoide, formándose  $\alpha$  y  $\gamma_2$  (Figura N° 2); esto es lo que ocurre en aleaciones comerciales específicas, cuyas composiciones permiten la presencia de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma_2$  (Brooks, 1982).

La fase  $\alpha$  es FCC, la fase  $\beta$  es BCC, al igual que la fase  $\beta$  en el sistema Cu-Zn, y las fases designadas con  $\gamma$  tienen una estructura BCC compleja, similar a la del latón- $\gamma$ . La composición eutectoide es de 11.8% de Al, y al enfriar lentamente una aleación de esta composición, después de la homogenización en la región  $\beta$ , se forman las fases  $\alpha$  y  $\gamma_2$  con un crecimiento cooperativo, como ocurre con la reacción eutectoide en el sistema Fe-C, donde se forma perlita. Este término también se utiliza para describir la estructura eutectoide del sistema Cu-Al.

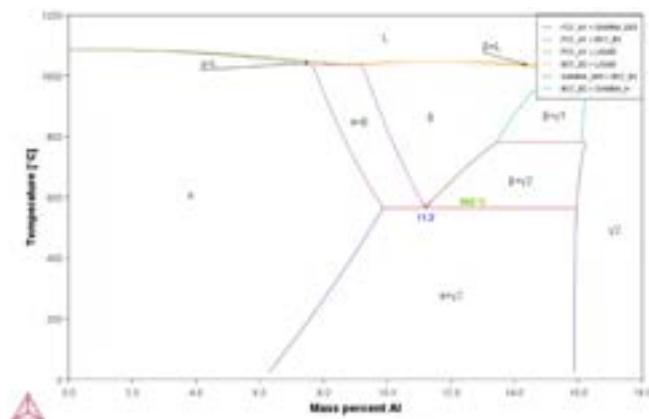


Figura N° 1. Diagrama de fases Cu-Al

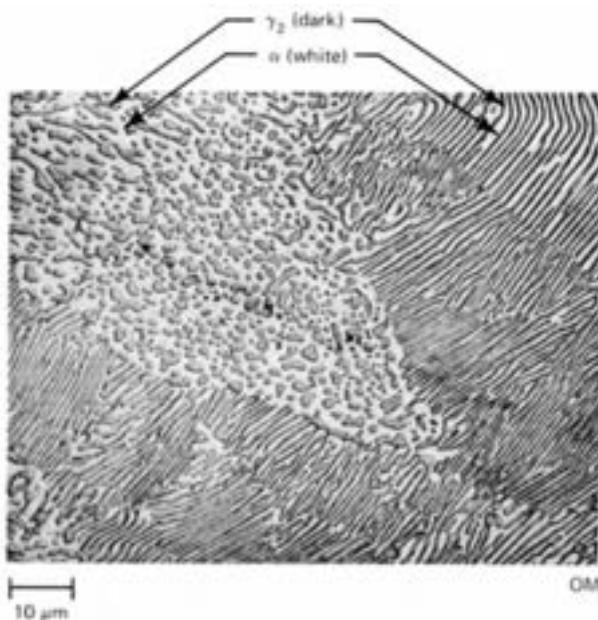


Figura N° 2. Microestructura de una aleación Cu-11.8%Al, homogenizada a 800°C durante 2 horas, luego enfriada lentamente en el horno. La estructura es perlita, compuesta de láminas alternas de  $\alpha$  y  $\gamma_2$

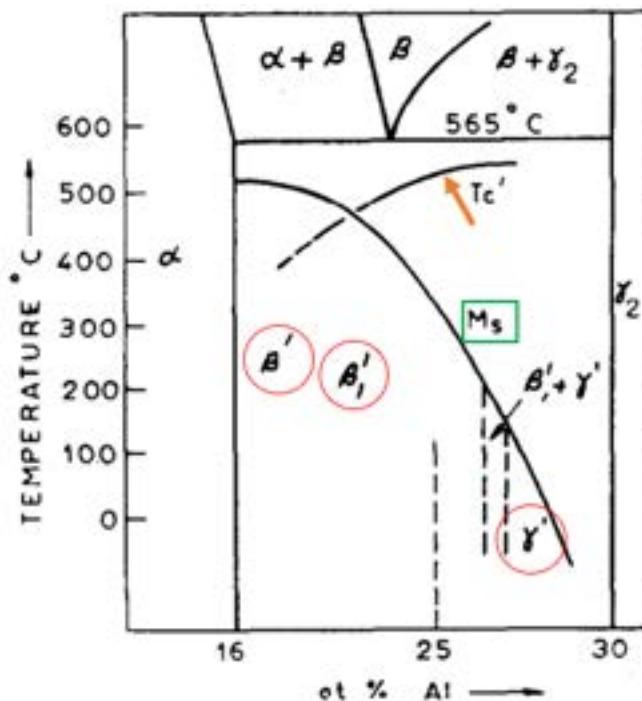


Figura N° 3. Porción del diagrama de fases Cu-Al, donde se destaca la Ms, Tc' y los tipos de martensita

### Transformación martensítica en el sistema Cu-Al

La transformación martensítica en este sistema ocurre cuando la fase  $\beta$  de alta temperatura se enfriá rápidamente, dando paso a una estructura de no equilibrio, que al igual que en sistema Fe-C recibe el nombre de martensita, aunque en este último participan átomos intersiticiales, en el sistema Cu-Al solo lo hacen átomos sustitucionales.

El efecto que conlleva esta transformación sobre las propiedades mecánicas es similar a lo que ocurre en los aceros, pero en menor proporción (Popplewell y Crane, 1971). Dicho efecto estará determinado por la cantidad de aluminio que contenga la aleación, que varía entre 9% a 14%Al (Kwarciak, 1986) y según esto, se tendrá martensita con diferentes morfologías, puesto que su estructura cristalina va variando, presentándose  $\beta'$  (tetragonal),  $\beta_1'$  (tetragonal ordenada) y  $\gamma'$  (ortorrómbica compleja), como se puede ver en la Figura N° 3 (Kulkarnit, 1973).

El término referente a estructura cristalina ordenada viene de la transición orden-desorden  $\beta \rightarrow \beta_1$  (Nakanishi, 1961), la cual fue estudiada en extenso por Wassermann, y en donde determinó que la fase ordenada tiene una estructura tipo DO3 similar a la del Fe3Al, y que la temperatura de orden  $T_c'$  es una función de la composición. Tanto la estimación esta temperatura como la Ms son mostradas en la Figura N° 3.

Es interesante resaltar que la martensita formada hereda la disposición ordenada de la fase madre  $\beta_1$ , dado que la transición orden-desorden no se puede suprimir, incluso con altas tasas de enfriamiento.

Kajiwara en sus experimentos describe fenómenos generales al calentar la martensita  $\beta'$  (Kajiwara y Nishiyama, 1964). Cuando una lámina delgada de martensita es calentada a una velocidad de 15°C/s, al llegar a una temperatura cercana a los 400°C comienzan a aparecer los primeros cristales de  $\beta_1$ , a esto es lo que se le denomina temperatura de transformación martensítica inversa o comúnmente As. La mayoría de los cristales  $\beta_1$  nuclearon en la región interior de la placa de martensita, y crecieron de manera recta y paralela, lo que sugiere que el crecimiento ocurrió a lo largo de un plano cristalográfico en la placa  $\beta'$  (Swann y Warlimont, 1963).

En la micrografía electrónica de transmisión tomada a 450°C (Figura N° 4), los cristales  $\beta_1$  aparecen brillantes. Estas placas  $\beta_1$  tienen una orientación idéntica, y después de alcanzar el límite entre los cristales de martensita  $\beta'$ , comenzaron a ensancharse y finalmente se unieron en un solo cristal (Kajiwara y Nishiyama, 1964).

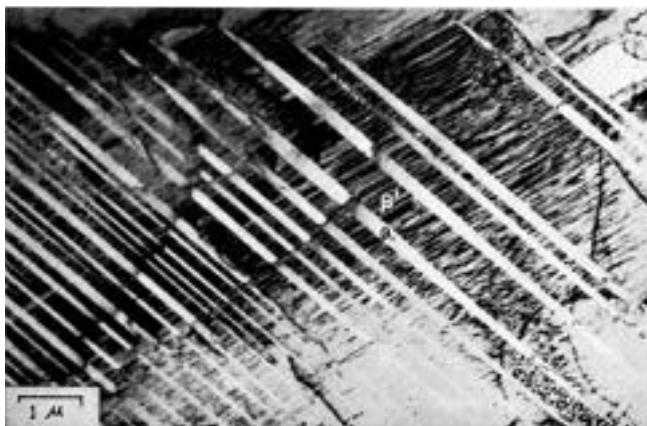


Figura N° 4. Micrografía electrónica tomada a 450°C, mostrando el crecimiento de cristales  $\beta_1$  (placas brillantes) en martensita  $\beta'$  (regiones estriadas).

Tanto la termodinámica de la transformación martensítica como la de la transición orden-desorden han sido estudiadas por algunos autores. A partir de los datos experimentales reportados, se han evaluado parámetros termodinámicos que permiten predecir la temperatura  $M_s$  o  $T_0$  en el sistema Cu-Al (Zhou *et al.*, 1991). Esto se puede apreciar en la Figura N° 5.

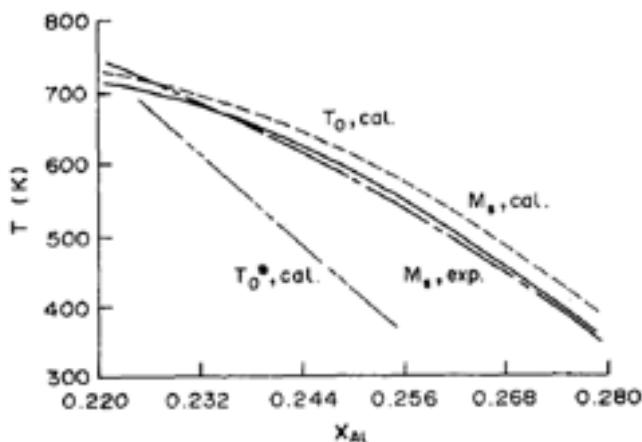


Figura N° 5. Temperaturas  $T_0^*$ ,  $T_0$  y  $M_s$

### Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma (SMA), son materiales funcionales utilizados en sensores y actuadores debido a su capacidad única para recuperar su forma original después de ser deformados (Recarte *et al.*, 1999). Este comportamiento es resultado de la transformación martensítica, un cambio microestructural que es esencial para las propiedades

de memoria de forma. En particular, la martensita termoelástica (Alaneme *et al.*, 2021) es un tipo de martensita que se caracteriza por poder regresar a su fase original de alta temperatura ( $\beta$ ) cuando el material se calienta, sin que la estructura sufra daños permanentes. Este proceso es fundamental para que las SMA puedan “recordar” su forma inicial.

Entre las aleaciones ternarias basadas en Cu-Al, las del sistema Cu-Al-Ni, se destacan por su amplio rango de temperaturas de transformación y su pequeña histéresis (Yildiz y Kok, 2014), lo que las hace alternativas atractivas a las aleaciones Ti-Ni. La adición de elementos como el Fe en Cu-Al-Ni permite modificar las temperaturas de transformación y mejorar las propiedades de estas aleaciones.

A pesar de sus ventajas, las aleaciones con memoria de forma basadas en Cu-Al-Ni presentan ciertos desafíos que han sido objeto de investigación para mejorar su desempeño en aplicaciones tecnológicas. Uno de los principales problemas es la estabilización martensítica, un fenómeno que reduce la reversibilidad de la transformación martensítica con el tiempo o tras ciclos térmicos repetidos, afectando la capacidad del material para recuperar su forma original. Este efecto puede mitigarse mediante la adición de elementos como Fe o Mn, que influyen en la estabilidad térmica y mecánica de la aleación, optimizando su respuesta termoelástica y pseudoelástica.

Además, se ha demostrado que la composición química juega un papel clave en la temperatura de transformación, con concentraciones de Al entre 11 y 14.5% y de Ni entre 3 y 5% siendo las más efectivas para mantener un comportamiento de memoria de forma confiable. Gracias a su capacidad de operar a temperaturas superiores a 200°C, las aleaciones Cu-Al-Ni han sido desarrolladas como alternativas a los sistemas Cu-Zn-Al y Ti-Ni, con aplicaciones en dispositivos de seguridad, sensores térmicos y actuadores inteligentes en sectores como la industria aeroespacial y la automotriz.

### Procedimiento Experimental

A partir de cobre y aluminio de alta pureza, se diseñó una aleación de Cu-11.5%Al, la cual fue solidificada en un molde de arena cilíndrico de 80 mm de largo y 40 mm de diámetro. De este lingote se obtuvieron tres muestras de 10 mm x 5 mm x 5 mm. Una de ellas se analizó en estado as-cast, otra fue homogenizada a 800°C durante 3 horas, enfriada en el horno y la tercera fue homogenizada a 800°C durante 4 horas, seguida de un enfriamiento en agua. La muestra en

estado as-cast y la homogenizada fueron montadas en baquelita, mientras que la última fue montada en resina con la finalidad de no alterar la microestructura con la temperatura. A cada muestra se le realizó un análisis metalográfico, que incluyó un ataque químico con Klemm II. Posteriormente, se realizó una prueba de microdureza Vickers con una carga de 200 gramos (HV 0,2) utilizando el durómetro Vickers ZwickRoell Indentec.

## Resultados y Discusión

La primera micrografía corresponde a la aleación en estado as-cast, donde las fases presentes son  $\alpha$  (zonas claras) y  $\gamma$  (zonas oscuras). Si se compara esto con la Figura N° 7, se puede observar que esta última tiene un tamaño de grano más grande y una microestructura más homogénea, donde destaca aún más la formación de la fase primaria y el producto de la reacción eutectoide. Por otro lado, la Figura N° 8 muestra una microestructura martensítica, donde es posible notar que existe una mezcla de tipos de martensita, siendo probablemente la más fina martensita  $\beta'$  y la más gruesa martensita  $\gamma'$ .

La dureza Brinell obtenida haciendo uso de la ASTM E140 se puede observar en la Tabla N° 1.

Estado	Dureza HB
As-cast	190
Enfriamiento lento	216
Enfriamiento rápido	284

Tabla N° 1. Dureza HB de los distintos estados de una aleación Cu-11,5%Al

En el caso del enfriamiento rápido, que es donde se obtiene la microestructura martensítica, se tiene la mayor dureza, en donde el valor coincide con lo reportado en la literatura. Sin embargo, se hace interesante cuestionarse porqué con un menor tamaño de grano como lo es el estado as-cast, se tiene una menor dureza que con el estado de enfriamiento lento, que posee un mayor tamaño de grano.

El endurecimiento de Hall-Petch es un fenómeno que describe cómo la resistencia de un material aumenta a medida que disminuye el tamaño de grano, pero hay ciertas limitaciones, siendo la segregación química una de ellas y con la cual se puede dar explicación a la diferencia en las durezas.

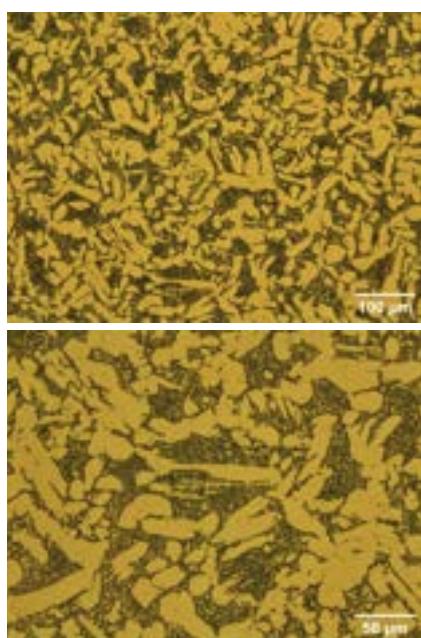


Figura N° 6. Micrografías de una aleación Cu-11,5%Al en estado as-cast

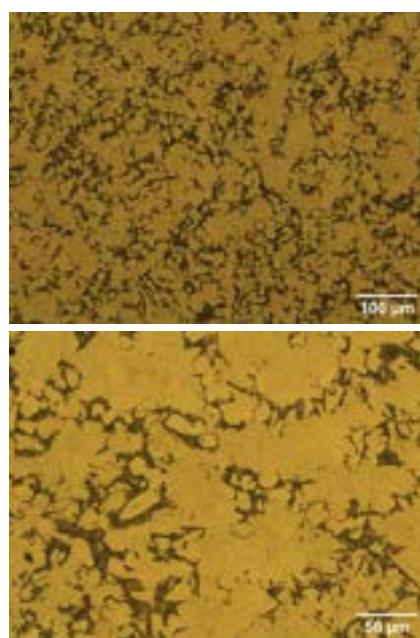


Figura N° 7. Micrografías de una aleación Cu-11,5%Al homogenizada a 800°C durante 3 horas y enfriada en el horno

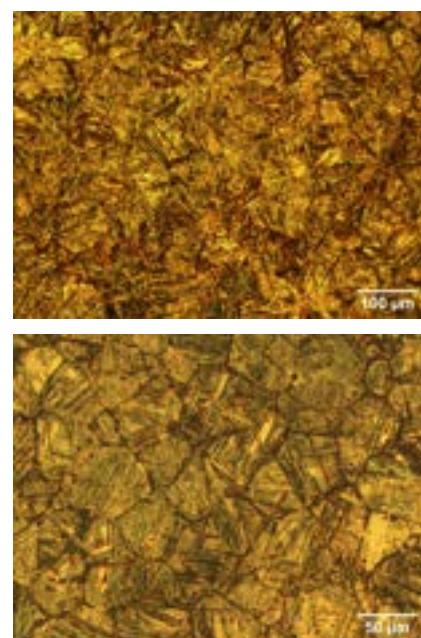


Figura N° 8. Micrografías de una aleación Cu-11,5%Al homogenizada a 800°C durante 4 horas y enfriada en agua

## Conclusiones

Aunque la transformación martensítica en el sistema Cu-Al ha sido estudiada principalmente en el contexto de aleaciones con memoria de forma, existen pocas investigaciones fuera de este ámbito. Este trabajo representa una recopilación de información y una exploración de la transformación martensítica en estas aleaciones, destacando la necesidad de continuar con estudios que complementen la determinación de la  $M_s$  y/o  $A_s$  junto con la energía libre asociada al cambio de fase.

Comprender mejor estos parámetros permitiría predecir la transformación y optimizar las aplicaciones de estas aleaciones en campos más allá de los dispositivos con memoria de forma.

Asimismo, con ciertos tratamientos térmicos para composiciones específicas, como la eutectoide, se ha reportado que la estructura de equilibrio (perlita) posee una mayor dureza que la martensita, lo que abre una vía interesante para futuros estudios. Replicar y validar estos hallazgos tendría gran valor científico.

La continuación de esta investigación es esencial para expandir el conocimiento sobre la transformación martensítica en el sistema Cu-Al y explorar sus potenciales aplicaciones en diversas industrias.

## Referencias

- Alaneme KK, Anaele JU, Okotete EA. 2021. Martensite aging phenomena in Cu-based alloys: Effects on structural transformation, mechanical and shape memory properties: A critical review. *Scientific African* 12: e00760 <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00760>
- Brooks CR. 1982. Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys. American Society for Metal, Library of Congress, Washington, USA.
- Kajiwara S, Nishiyama Z. 1964. The orientation relationships and crystal habits in the martensite transformation of a Cu-Al alloy. *Japanese Journal of Applied Physics* 3 (12): <https://doi.org/doi:10.1143/jjap.3.749>
- Kulkarni SD. 1973. Thermodynamics of martensitic and eutectoid transformations in the Cu-Al system. *Acta Metallurgica* 21 (10): 1461-1469. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90095-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90095-3)
- Kwarcia J. 1986. Phase transformations in Cu-Al and Cu-Zn-Al alloys. *Journal of Thermal Analysis* 31: 559-566. <https://doi.org/10.1007/BF01914232>
- Nakanishi N. 1961. The crystal structure of  $\beta'$  Martensite in Cu-Al binary alloys. *Transactions of the Japan Institute of Metals* 2 (2): 79-85. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.2.79>
- Popplewell JM, Crane J. 1971. Order-strengthening in Cu-Al alloys. *Metallurgical and Materials Transactions* B 2: 3411-3420. <https://doi.org/10.1007/BF0281162>
- Recarte V, Pérez-Sáez RB, Bocanegra EH, Núñez ML, San Juan J. 1999. Dependence of the martensitic transformation characteristics on concentration in Cu-Al-Ni shape memory alloys. *Materials Science and Engineering*. 273-275: 380-384. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00302-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00302-0)
- Swann PR, Warlimont H. 1963. The electron-metallurgy and crystallography of copper-aluminum martensites. *Acta Metallurgica* 11: 511-527. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(63\)90086-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(63)90086-5)
- Yıldız K, Kok M. 2014. Study of martensite transformation and microstructural evolution of Cu-Al-Ni-Fe shape memory alloys: Effect of heat treatments. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 115: 1509-1514. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3409-4>
- Zhou XW, Hsu TY. 1991. Thermodynamics of the martensitic transformation in Cu-Al alloys. *Acta Metallurgica et Materialia* 39 (6): 1041-1044. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90190-C](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90190-C)