

XII Jornadas Doctorales

Procesado de multimateriales del sistema Cu-Al mediante sinterización reactiva activada con Energía Solar Concentrada

A. Sánchez Romero¹, G.P. Rodríguez Donoso², A. Romero Gutiérrez¹, A. Cañadilla Sánchez¹

¹Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial (EIIA), Instituto de Investigación Aplicada a la Industria Aeronáutica (INAIA), UCLM, Toledo, España

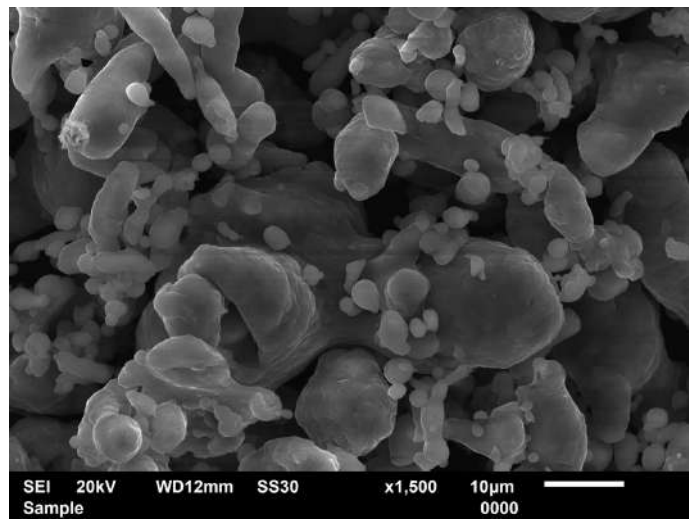
²Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII), Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), UCLM, Ciudad Real, España

RESUMEN

Los multimateriales han adquirido relevancia en sectores como el energético y el aeroespacial por su capacidad de combinar propiedades avanzadas en un solo componente, mejorando el rendimiento, la durabilidad y la seguridad operativa. Este trabajo tiene como objetivo emplear la energía solar concentrada para activar reacciones de síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS-ESC) durante el procesado de multimateriales del sistema Cu-Al. Se han diseñado tres configuraciones experimentales: (a) mezclas de polvos Cu-Al, (b) sistemas multicapa Cu/Al/Cu y (c) sistemas multicapa con una capa intermedia reactiva Cu/Cu-Al/Cu. La caracterización mediante microscopía óptica y análisis SEM-EDX confirma que el calor liberado por las reacciones altamente exotérmicas ha generado una sinterización reactiva, promoviendo la formación de compuestos intermetálicos (aluminuros de cobre con distintas estequiometrías), mejorando la unión entre capas y reduciendo la porosidad.

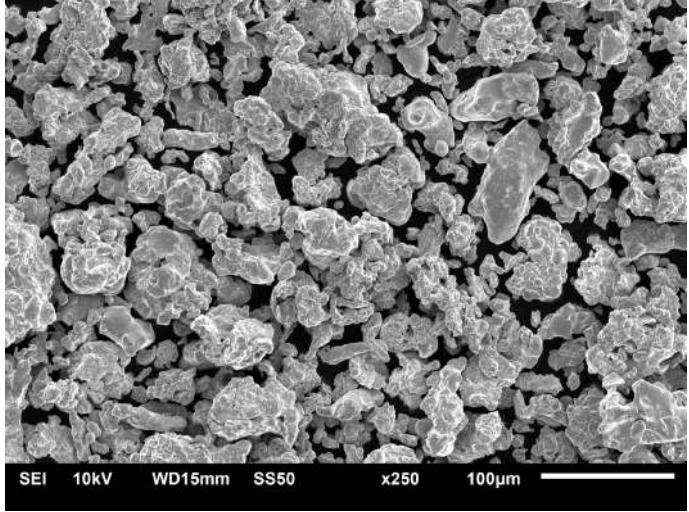
CARACTERIZACIÓN Y MEZCLA DE LOS POLVOS

Aluminio



Pureza:	99.5%
Tamaño de partícula:	45 μm
Temperatura de fusión:	660.3 °C
Densidad:	8.87 g/cm ³

Cobre

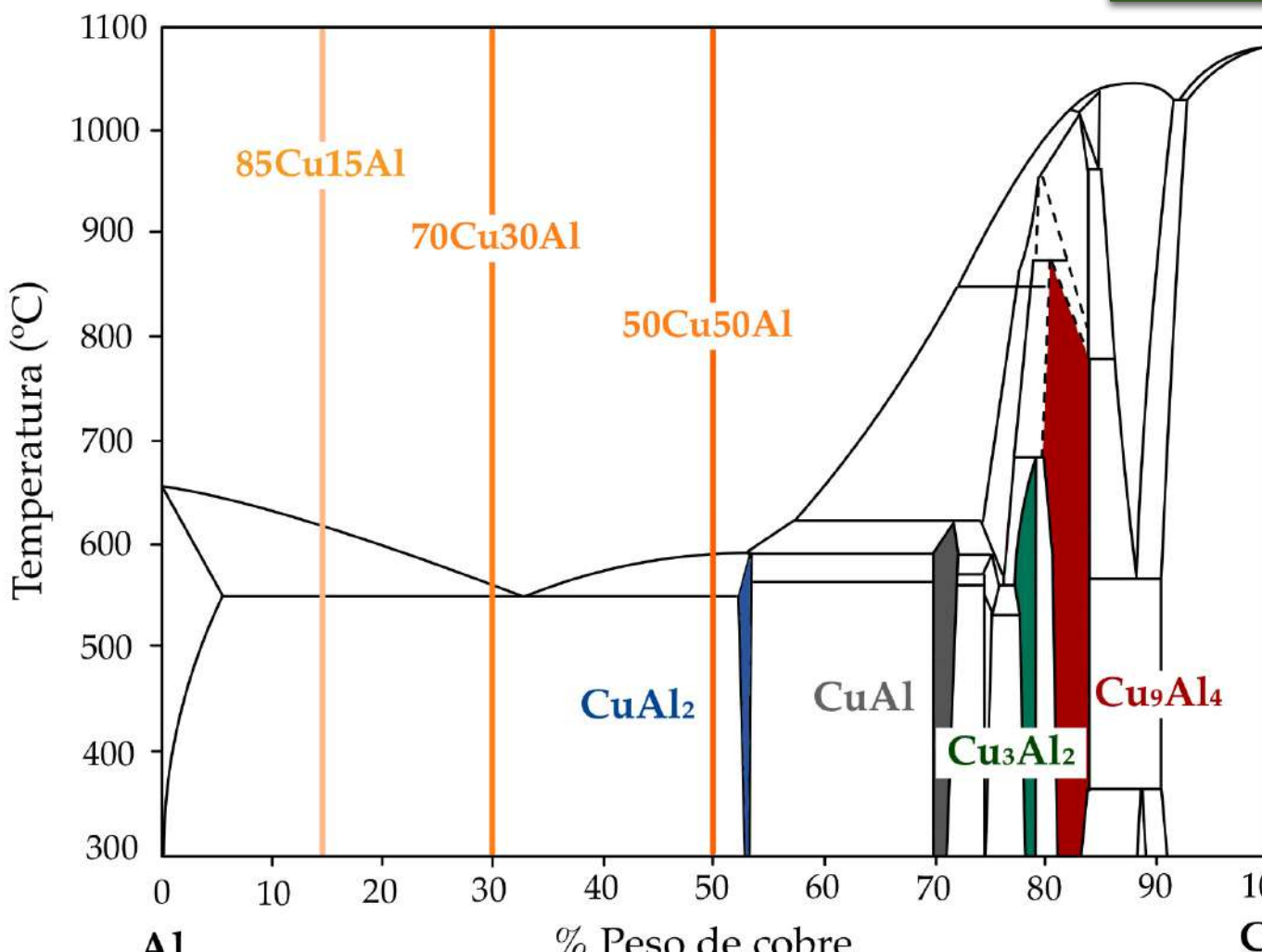


Pureza:	99.5%
Tamaño de partícula:	45 μm
Temperatura de fusión:	1085 °C
Densidad:	8.74 g/cm ³



Las mezclas de polvos se realizan utilizando un molino de bolas *Retsch PM 100* durante 20 min a 100 rpm invirtiendo el sentido de giro cada 2 min haciendo una parada de 15s.

DISEÑO DE CONFIGURACIONES



Los compuestos intermetálicos cobre-aluminio se caracterizan por su alta conductividad, gran resistencia y dureza, así como por su excelente estabilidad térmica y resistencia a la corrosión.

Monocapa	Multicapa
100 Cu	Cu/Al/Cu
100 Al	Cu/85Cu-15Al/Cu
85Cu-15Al	Cu/70Cu-30Al/Cu
70Cu-30Al	Cu/50Cu-50Al/Cu
50Cu-50Al	

Las composiciones de la capa de mezcla reactiva se expresan en porcentaje en peso de los polvos utilizados.

COMPACTACIÓN UNIAXIAL

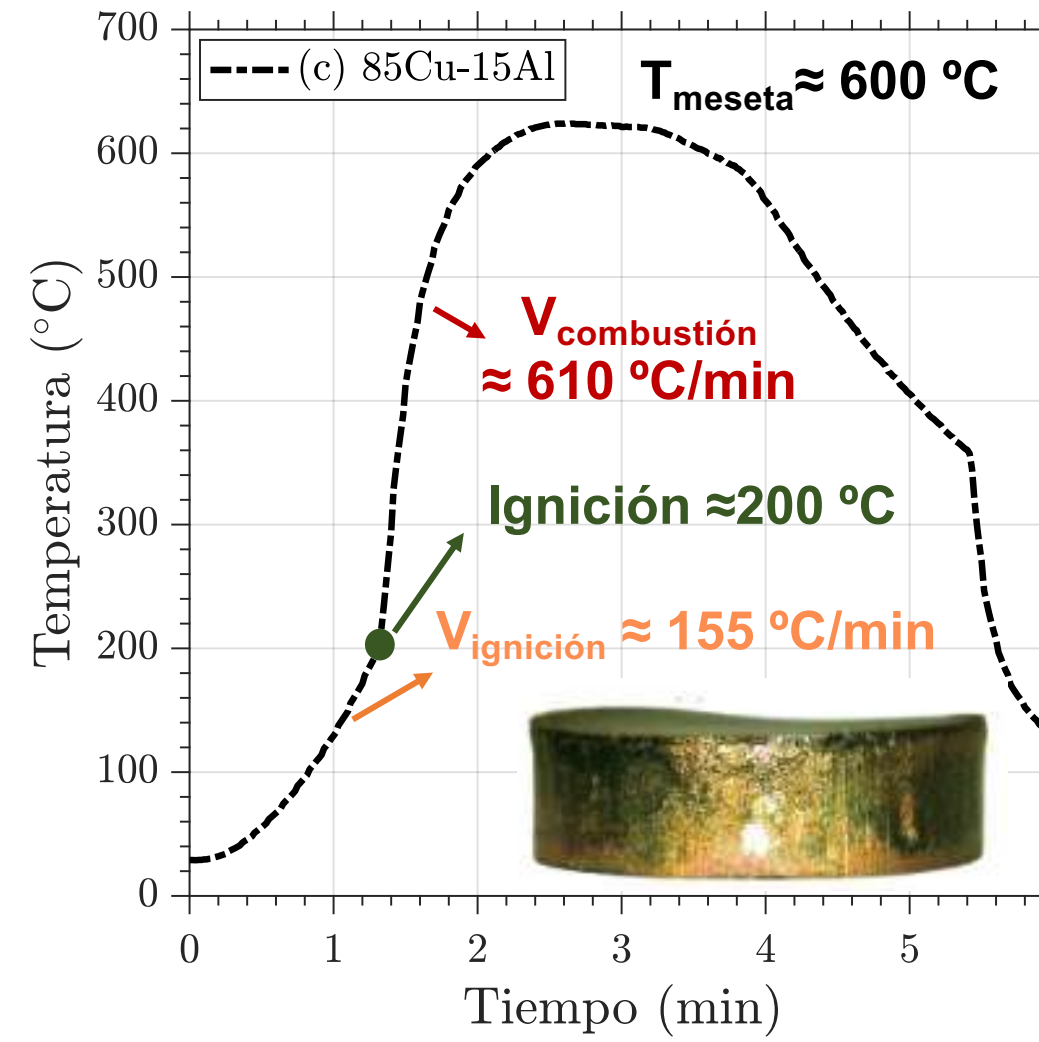
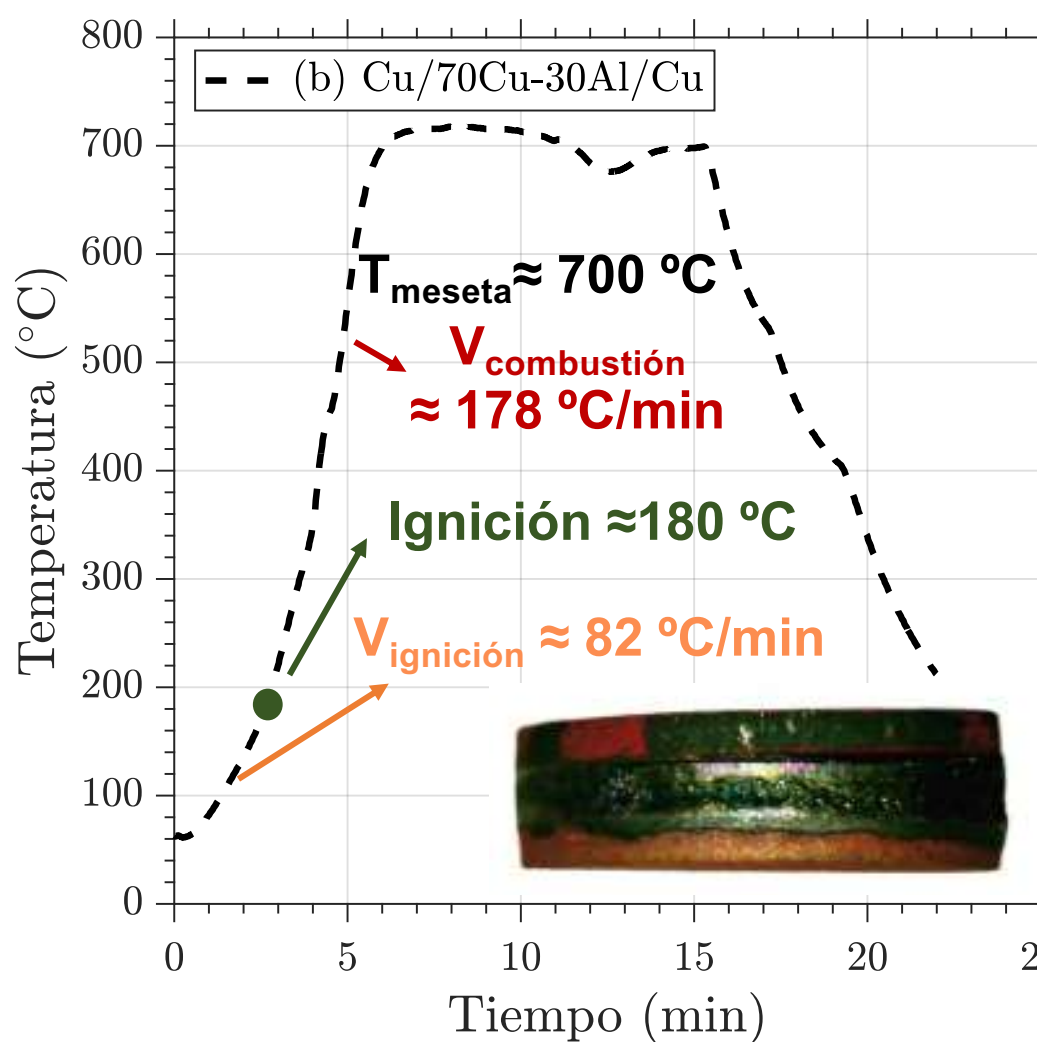
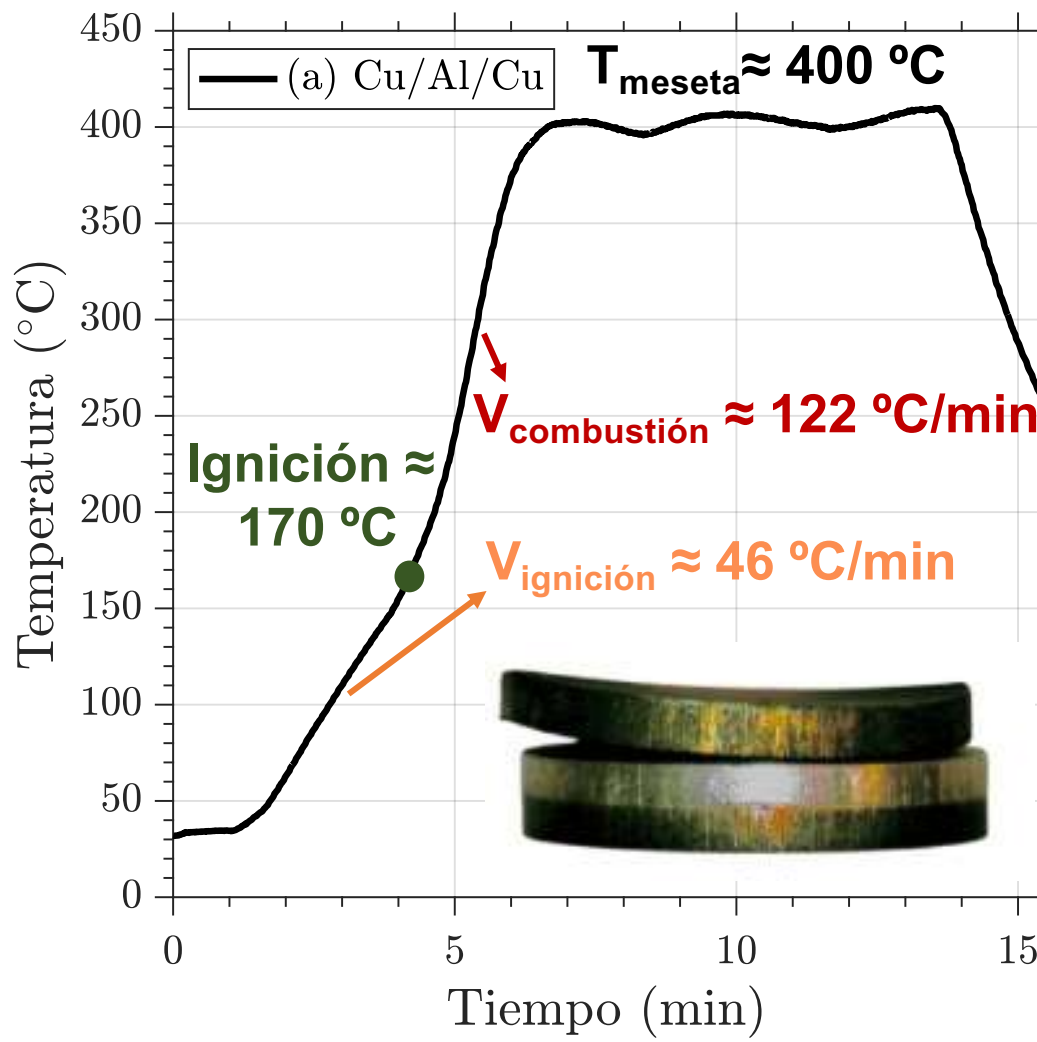
Las muestras se compactan aplicando una presión de 200 MPa durante 2 min.

Energía liberada en la formación del intermetálicos Cu-Al

Reacción	ΔG (J/mol)
Cu_9Al_4	-334000 + 96.1T
Cu_3Al_2	-128440 + 36.9T
CuAl_2	-77100 + 22.3T
CuAl	-51380 + 14.8T

SINTERIZACIÓN SOLAR REACTIVA

A mayor contacto entre los polvos de cobre y aluminio, se incrementa la velocidad de combustión y la liberación de energía, favoreciendo una mejor unión entre capas.



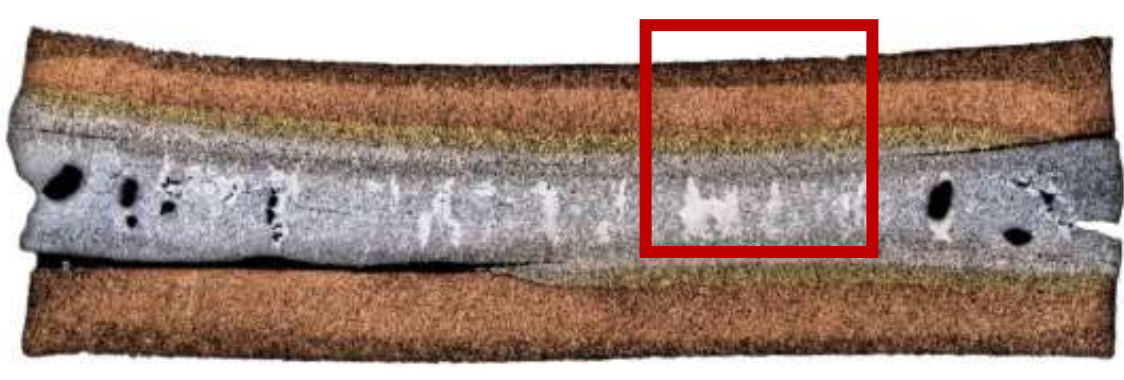
La sinterización reactiva genera un cambio en la pendiente térmica por la reacción exotérmica. La síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS), activada por altas tasas de calentamiento, permite alcanzar elevada densificación y buenas propiedades en pocos minutos. El uso de energía solar mejora la eficiencia y acelera el proceso.

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

MICROSCOPIA ÓPTICA



(a) Multicapa Cu/Al/Cu

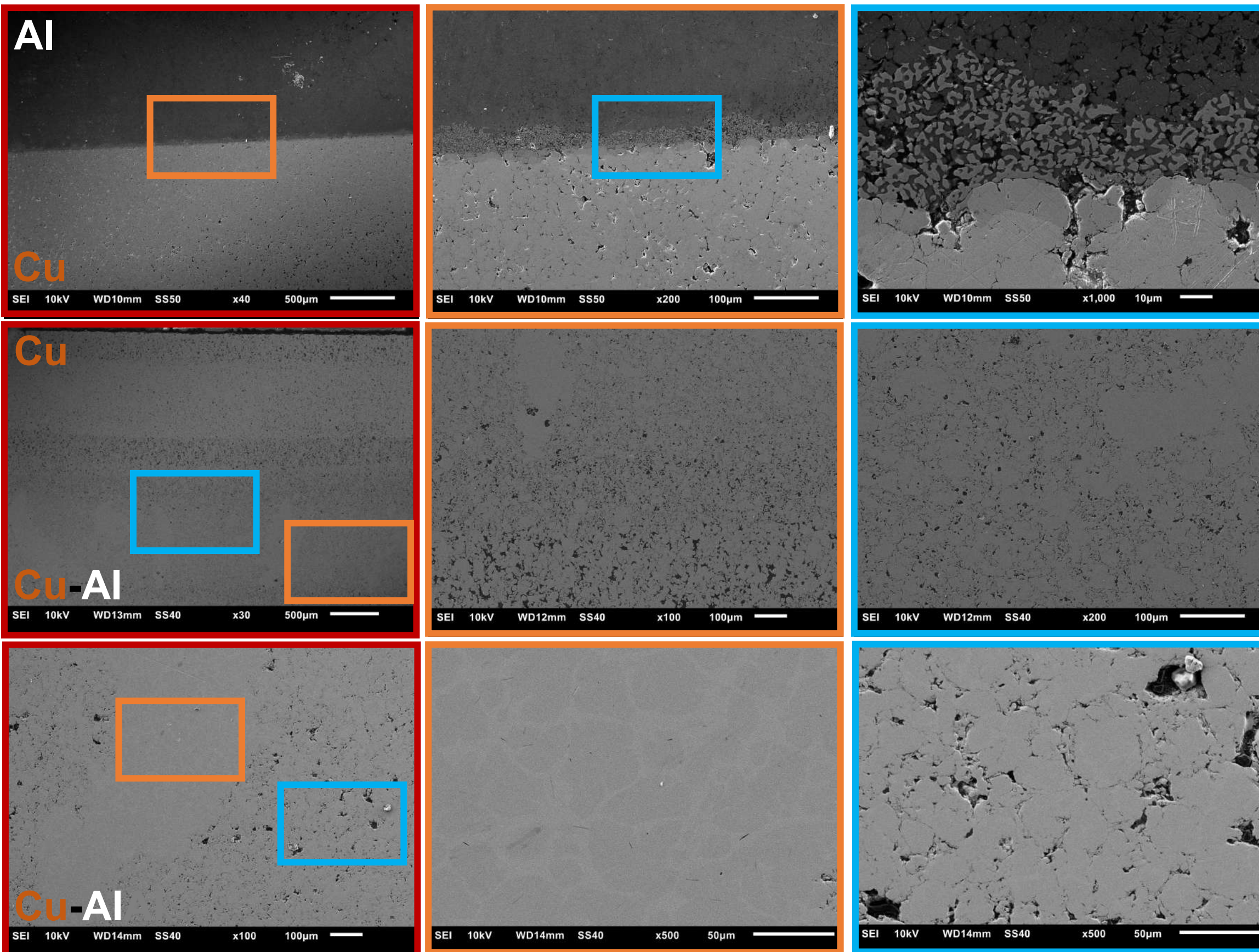


(b) Multicapa Cu/70Cu-30Al/Cu

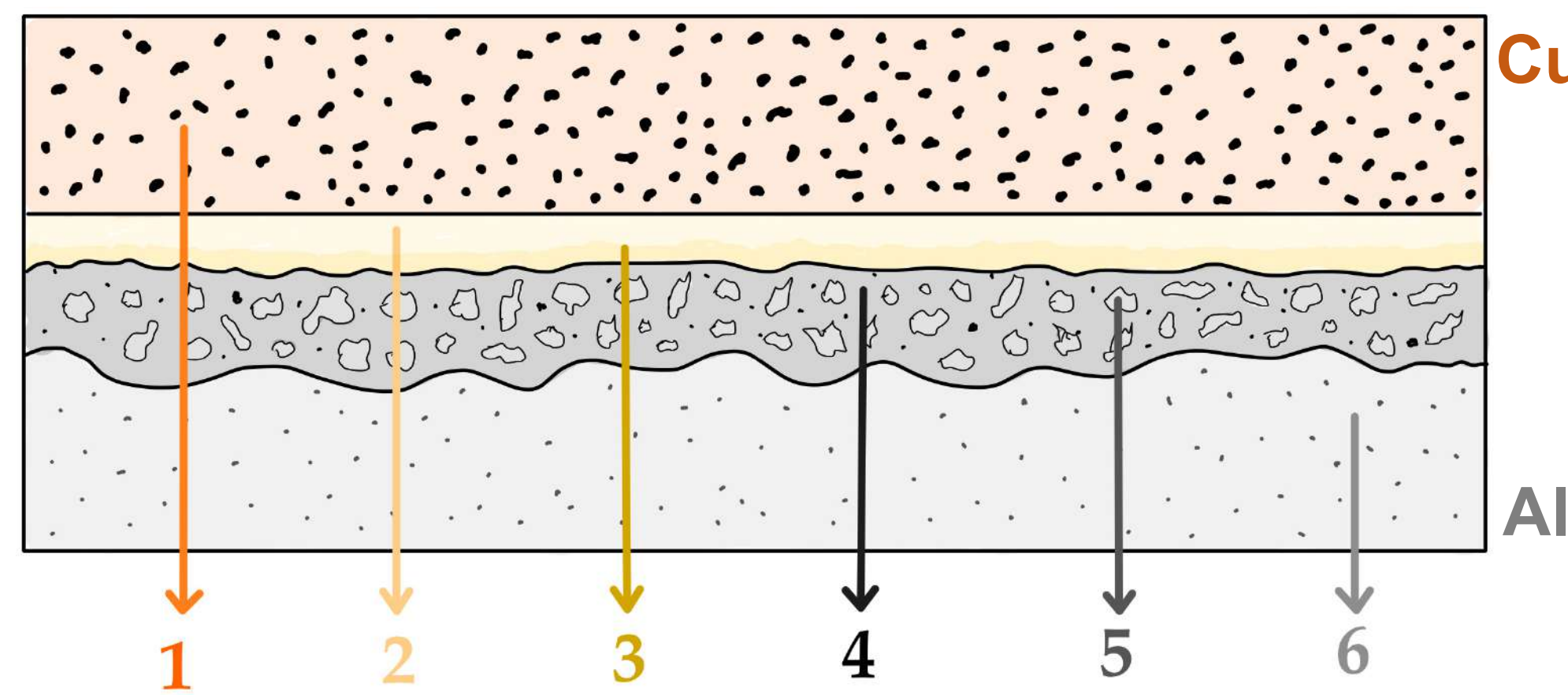


(c) Monocapa reactiva 85Cu-15Al

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)



El uso de reacciones SHS activadas con energía solar concentrada favorece la formación de zonas monofásicas y bifásicas compuestas por intermetálicos de distintas estequiometrías.



La transición de unos compuestos a otros se observa que es más gradual al incorporar mezcla de polvos en el material. Esto disminuye la tasa de generación de grietas y delaminaciones por las propiedades disimilares de los compuestos.

ANÁLISIS COMPOSICIONAL (EDX)

Multicapa Cu/Al/Cu

Región	Cu	Al	Fases
1	100	0	Cu
2	83	17	Cu_9Al_4
3	70	30	CuAl
4	79	21	Cu_3Al_2
5	55	45	CuAl_2
6	10	90	(Al)

Las composiciones de cada región se expresan en porcentaje en peso.

Los intermetálicos formados varían en función de la composición local. En la zona central bifásica se generan compuestos como el CuAl_2 , conocido por su contribución al endurecimiento por precipitación en las aleaciones de duraluminio, proporcionando alta dureza y resistencia.

CONCLUSIONES

La sinterización reactiva activada con energía solar facilita la obtención de compuestos intermetálicos mediante reacciones SHS, logrando una adecuada adherencia en multimateriales y promoviendo la formación de intermetálicos en sus intercaras. En materiales **multicapa** de cobre y aluminio, se observa la formación gradual de compuestos intermetálicos según la composición local, destacando Cu_9Al_4 , Cu_3Al_2 , CuAl y CuAl_2 a medida que aumenta el contenido de cobre. Las muestras con una **capa reactiva intermedia** presentan una mejor unión entre capas y la formación de compuestos en toda la capa central e intercaras, favoreciendo una distribución más homogénea de las fases. Por último, las muestras **monocapa de mezcla** generan intermetálicos con una baja pérdida de forma, lo que indica un mejor control de las tensiones residuales y una mayor estabilidad estructural.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Ferriere, G.P. Rodríguez & J.A. Sobrino. Flux distribution delivered by a Fresnel lens used for concentrating solar energy. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The ASME* 126 (1) (2024) 654-660.
- D. Zhao, W. Guo, Z. Shang, C. Xu, X. Gao & X. Wang. The growth behavior and kinetics of intermetallic compounds in Cu-Al interface at 600 °C – 800 °C. *Intermetallics* 168 (2024) 108244.