Síntesis de intermetálicos Ti-Al mediante sinterización solar reactiva

A. Sánchez Romero[1], A. Romero Gutiérrez[1], G.P. Rodríguez Donoso[2], A. Cañadilla Sánchez[1]

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

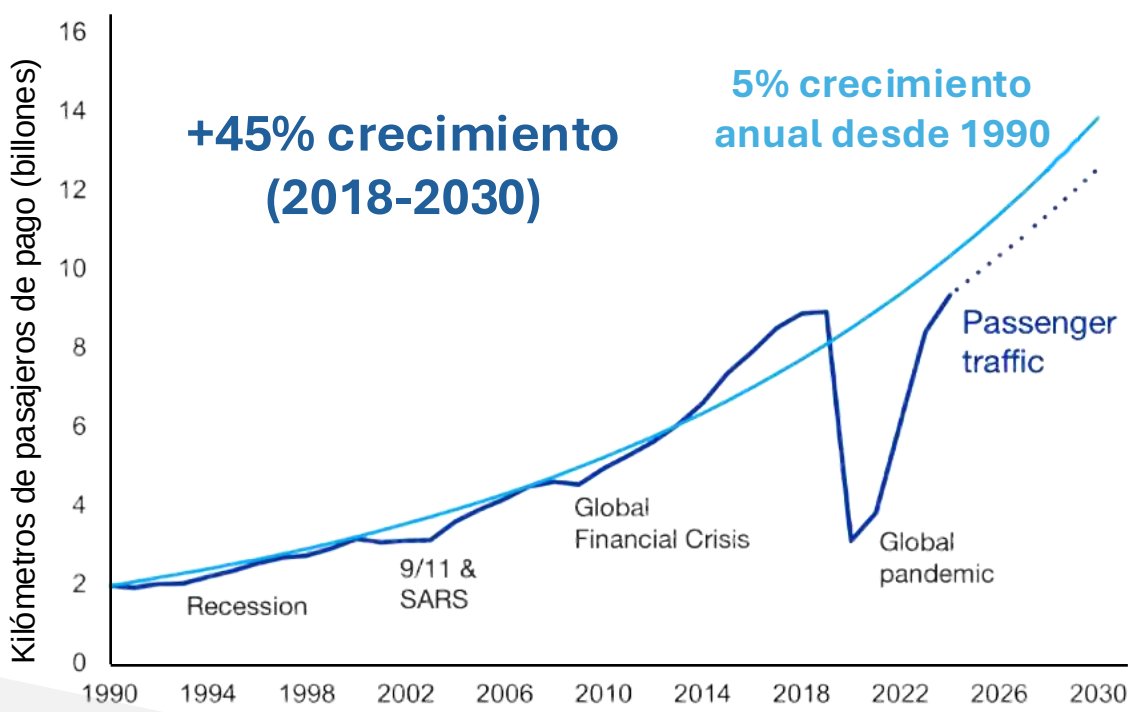
[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII), Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), UCLM, Ciudad Real, España

Abraham.Sanchez@uclm.es

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

Impacto de la aviación



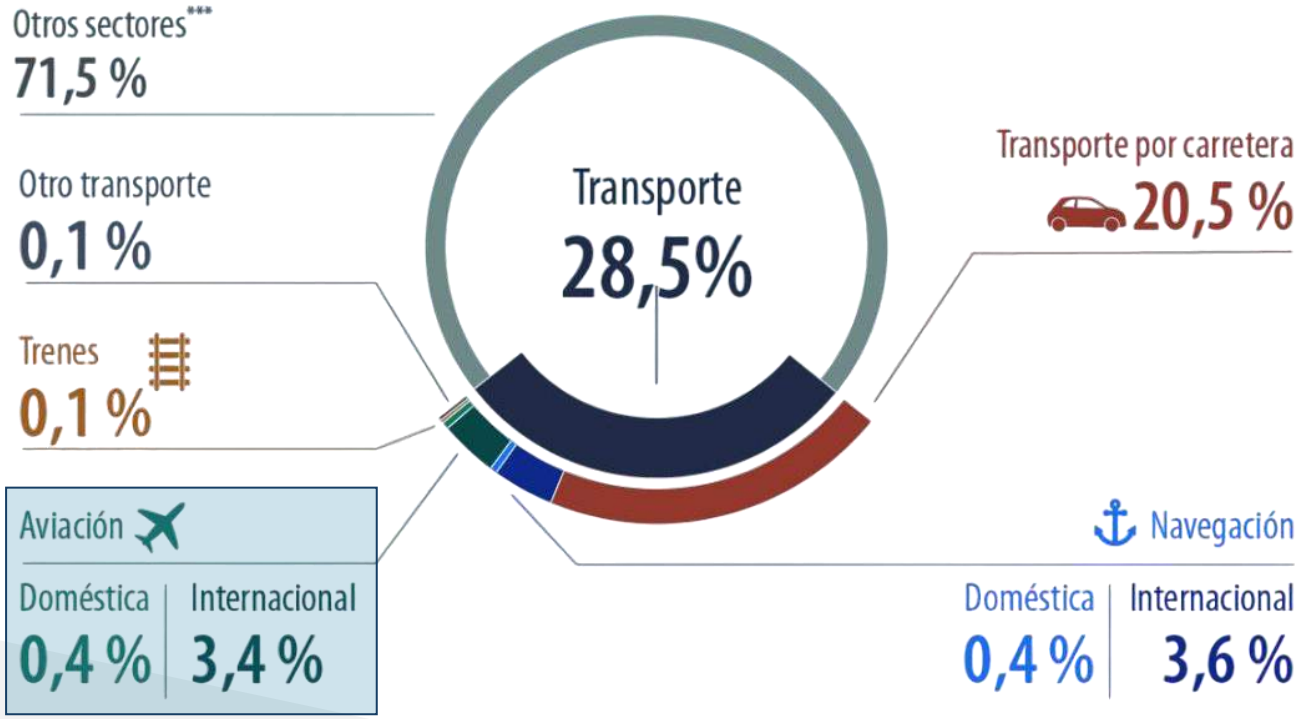
Fuente: Cirium, S&P Global Market Intelligence, Boeing Analysis

Datos del 2024

- ↑ 2.7% PIB a nivel mundial
- 4.8 mil millones de pasajeros
- 83.5% factor de ocupación

Fuente: Global Market Forecast Airbus 2025, IATA June 2025, S&P Global

Camino hacia el carbono cero



Fuente: Agencia Europea del Medioambiente (2022)

Plan estratégico OACI 2026-2050

Aviación sostenible. Cero emisiones 2050

2030 — 100% uso SAF para 2023

2035 — ↓46% emisiones CO_2

2050 — Cero emisiones CO_2

Fuente: Global Market Forecast Airbus 2025, IATA, Airbus GMF 2025

Rutas hacia la descarbonización

Directas

Usar menos **energía**

- Aerodinámica
- Estructuras
- Propulsión
- Infraestructura/ Operaciones

Uso de **energía** descarbonizada

- SAF
- H_2 Hidrógeno como combustible

Distribución de masas



- 1/3 Combustible
- 1/3 **Materiales**
- 1/3 Tripulación

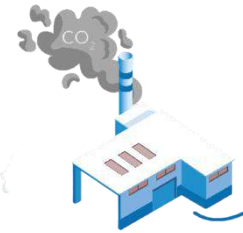
Mayor rendimiento
Menor peso

Indirectas

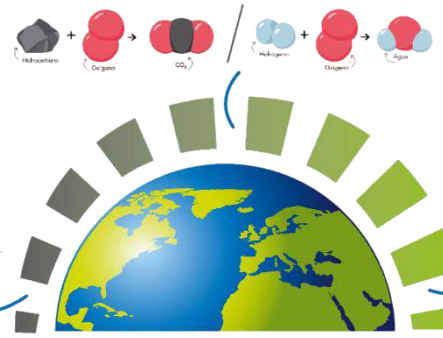
Pacto verde Europeo 2050

Procesos de fabricación **Sostenibles**

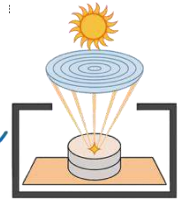
La industria manufacturera genera gases de efecto invernadero



Nuevos procesos de combustión

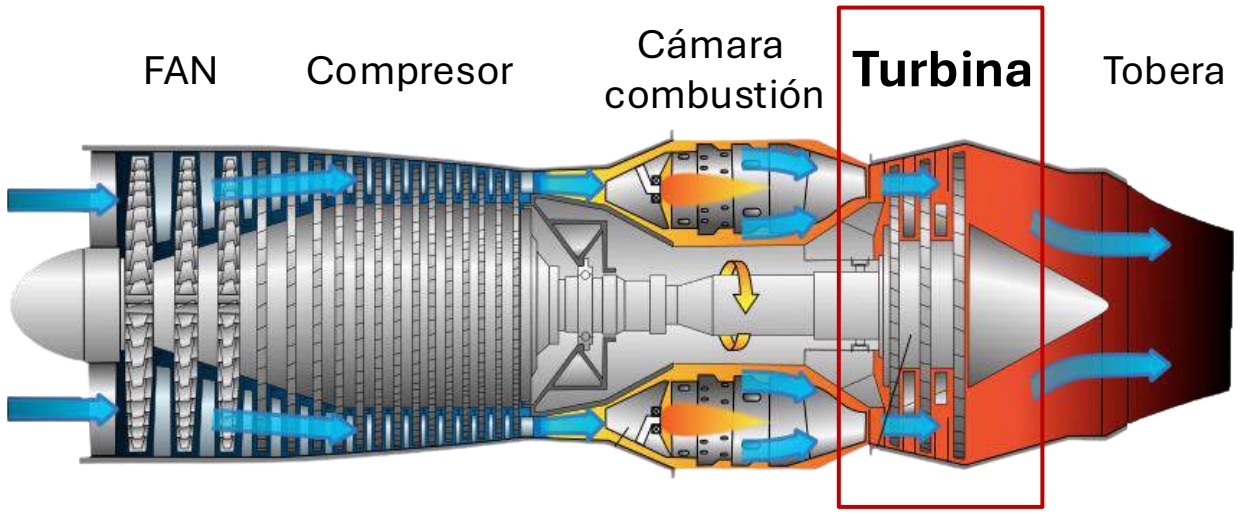


Tecnologías limpias de procesado



Fuente: Kalfrisa

Materiales para turbinas de motor



Titanio

FAN + CBP +2/3 CAP

Superaleaciones base Ni (Inconel)

1/3CAP+CC+TAP+TBP+ Tobera

Requisitos de materiales

- Resistencia a altas temperaturas
- Resistencia a la fatiga
- Baja densidad
- Buena conductividad térmica
- Resistencia a la oxidación y corrosión
- Dureza superficial

TiAl vs Superaleaciones

Turbina Baja Presión (TBP): Temperaturas de operación ≈ 800 ºC

	Ti-Al Intermetálico	Inconel
Temperatura máxima de operación (ºC)	**750-850**	1050-1150
Resistencia a la fatiga	Moderada Formación de grietas por fragilidad	Alta
Densidad (g/cm^3)	**3.9-4.2**	8.2-8.9
Conductividad térmica (W/m^2)	**15-25**	10-15
Resistencia a la oxidación y corrosión	Buena, forma capa protectora de Al_2O_3	Muy alta
Dureza superficial	Alta	Alta
Coste	**Medio**	Alto

TiAl vs Superaleaciones

GE Aerospace
https://www.geaerospace.com › g...

GE Aviation fired up on CMCs

The GEnx demonstrator engine will be rebuilt and run with the same combustor liners, HPT stage 1 shrouds and HPT stage 2 nozzles, LPT TiAl blades and the next- ...

Harvard University
https://ui.adsabs.harvard.edu › abs

TiAl alloys in commercial aircraft engines

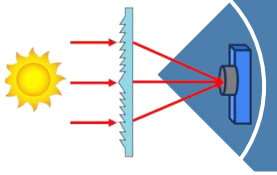
de BP Bewlay · 2016 · Citado por 771 — The present article will describe aspects of the science and technology of titanium aluminide (TiAl) alloy system and summarise the low and high temperature ...

MTU Aero Engines
https://www.mtu.de › press-archive

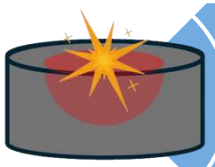
MTU Aero Engines develops new turbine blade material

23 mar 2015 — Titanium aluminide (TiAl) is the name of the new lightweight material for turbine blades that combines the advantages of metallic and ceramic materials.

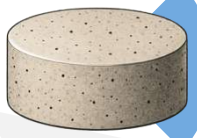
Objetivos



Uso de la energía solar concentrada para el procesado de materiales avanzados



Activación de reacciones de Síntesis Autopropagadas a Altas Temperaturas (SHS)

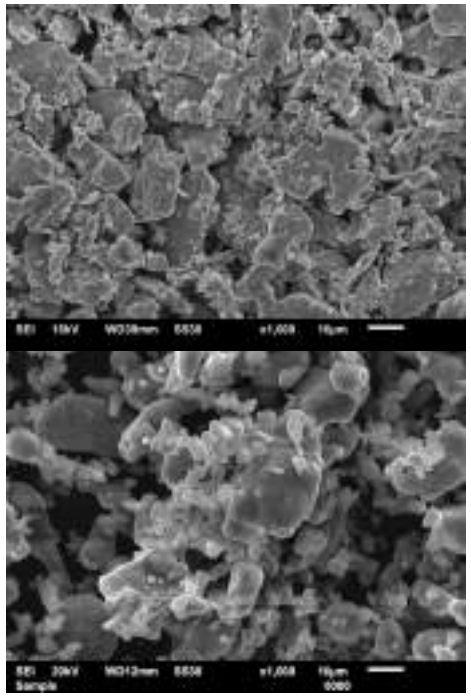


Síntesis de intermetálicos del sistema Ti-Al

Metodología

Titanio

Aluminio

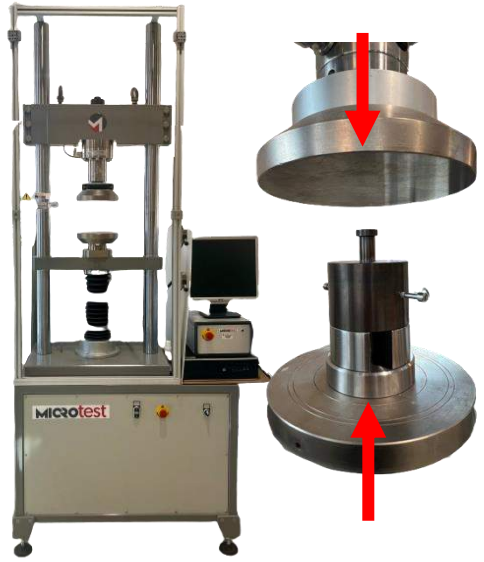


Tamaño de partícula < 45 μm

Mezclado



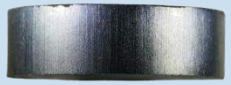
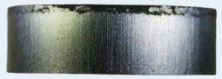
Compactación



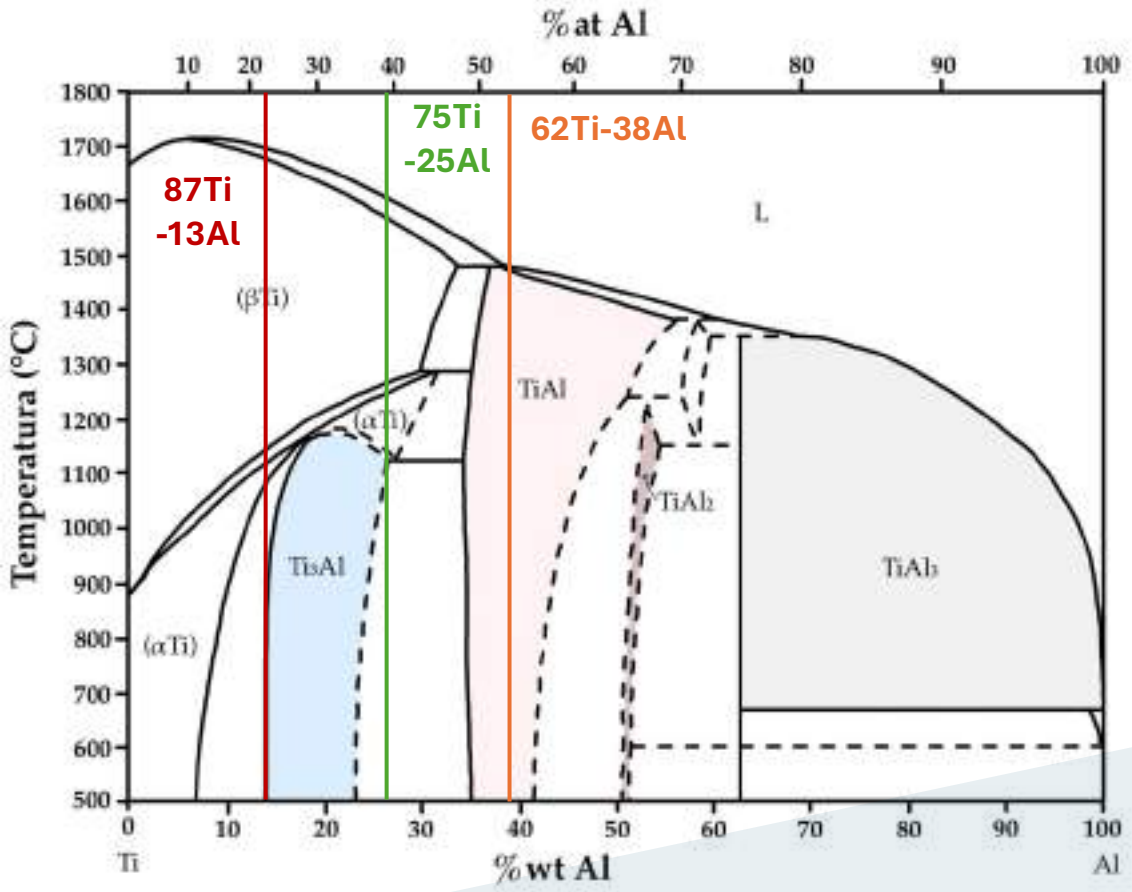
Sinterización Solar



Sistemas fabricados

Monocapa	
Titanio 	75Ti-25Al 
87Ti-13Al 	62Ti-38Al 
Atmósfera	
Argón	

Composiciones expresadas en %wt

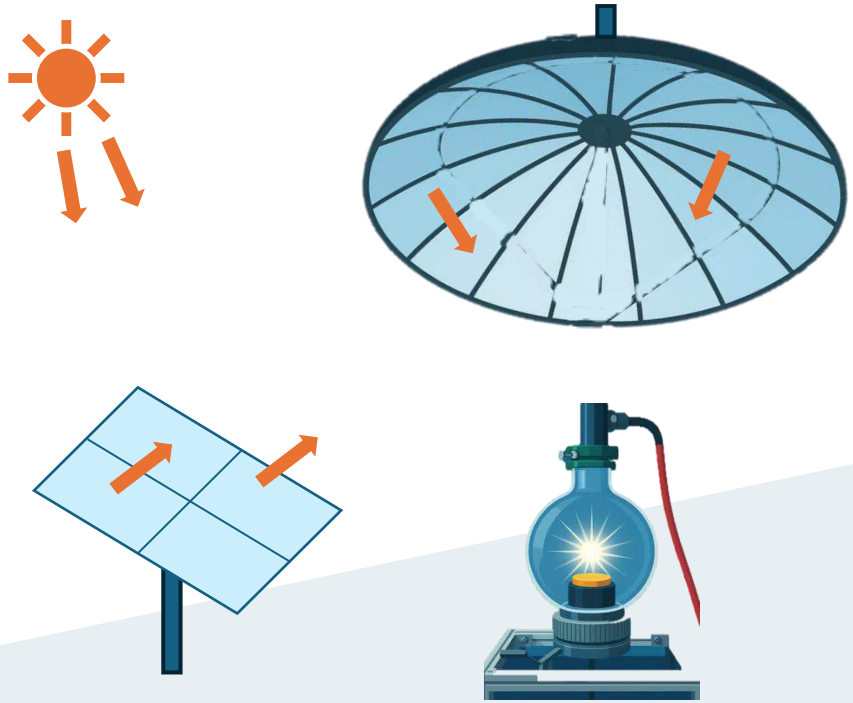


Energía Solar Concentrada (ESC)

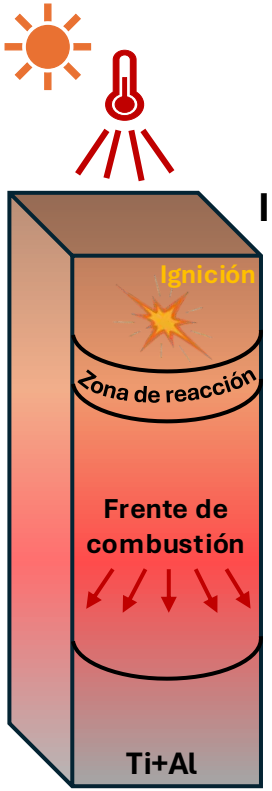


Horno solar de Odeillo: PROcédés Matériaux et Energy Solaire (Promes-CNRS)

- **<u>Activación de reacciones exotérmicas</u>**
- Activación de la sinterización reactiva
- Procesado sostenible de materiales metálicos en apenas unos minutos

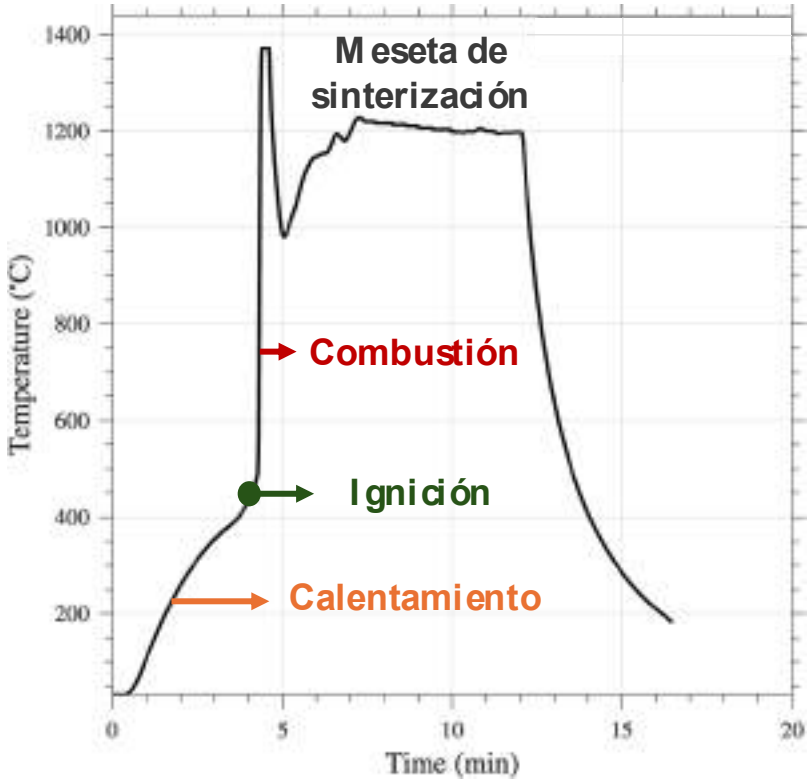


Síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS)



Intermetálico

Mezcla de polvos



La reacción permite la síntesis de intermetálicos:

Compuestos de estequiometría fija, enlaces iónico o covalente y propiedades comprendidas entre metales y cerámicos

Primera fase intermetálica

$$Ti + 3Al = TiAl_3 + \Delta H_1$$
$$TiAl_3 + 2Ti = 3TiAl + \Delta H_2$$ → Fase principal estable
$$3TiAl + Ti = Ti_3Al + \Delta H_3$$

Fase estable rica en Ti

$$\Delta G_{f1}(TiAl_3) = -40349 + 10{,}365 \cdot T$$
$$\Delta G_{f2}(TiAl) = -37445 + 16{,}793 \cdot T$$
$$\Delta G_{f3}(Ti_3Al) = -29233 + 6{,}708 \cdot T$$

Unidades J/mol. Temperatura expresada en Kelvin

Trabajos previos:

[1] A, Romero; G.P, Rodríguez; E, Marjaliza *Journal of Alloys and Compounds, Processing of intermetallic laminates by Self-Propagating High–Temperature Synthesis initiated with concentrated solar energy*, **2021**, *891*.

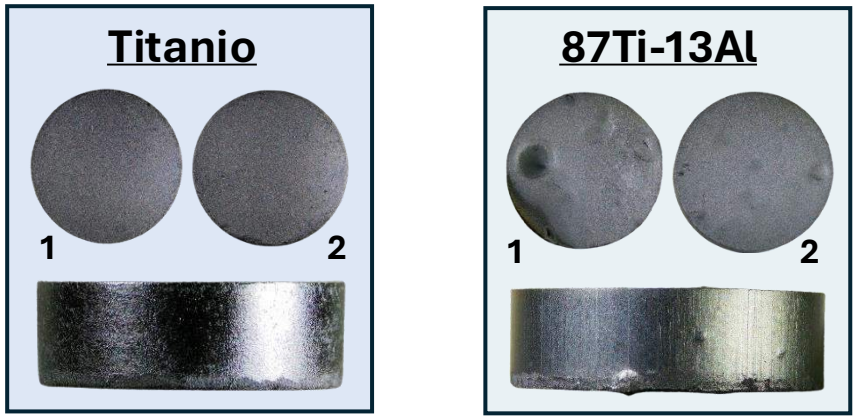
Fuente:
[2] H, Sina; S, Iyengar *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Reactive synthesis and characterization of titanium aluminides produced from elemental powder mixtures*, **2015**, *122, 689-698*.

Macrografías

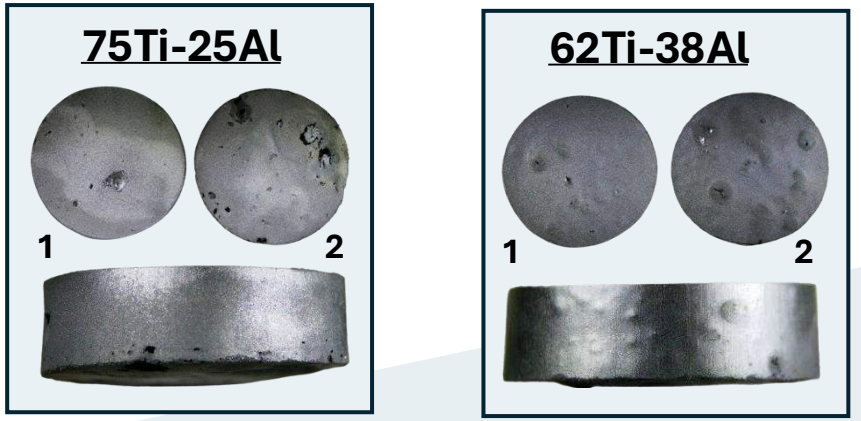




1200 ºC 5 min

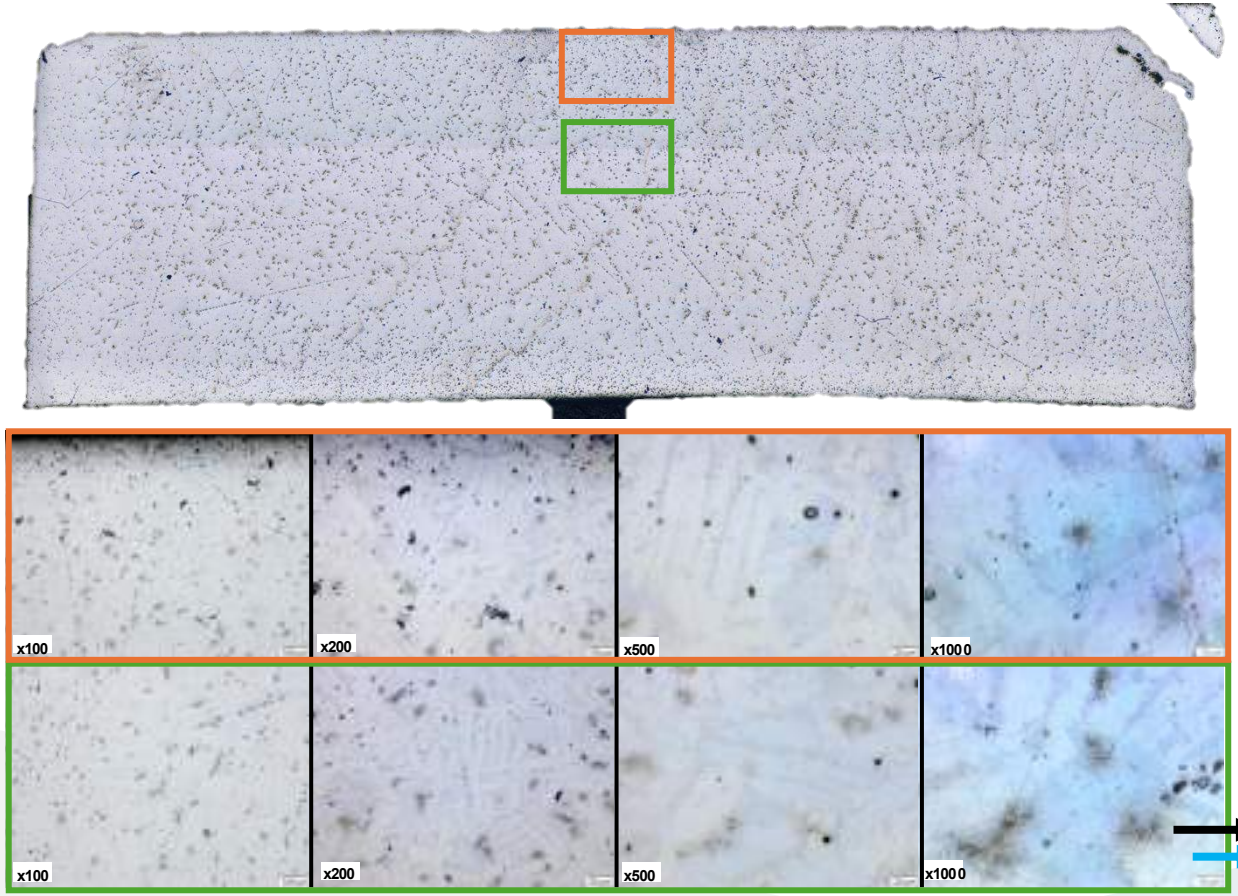


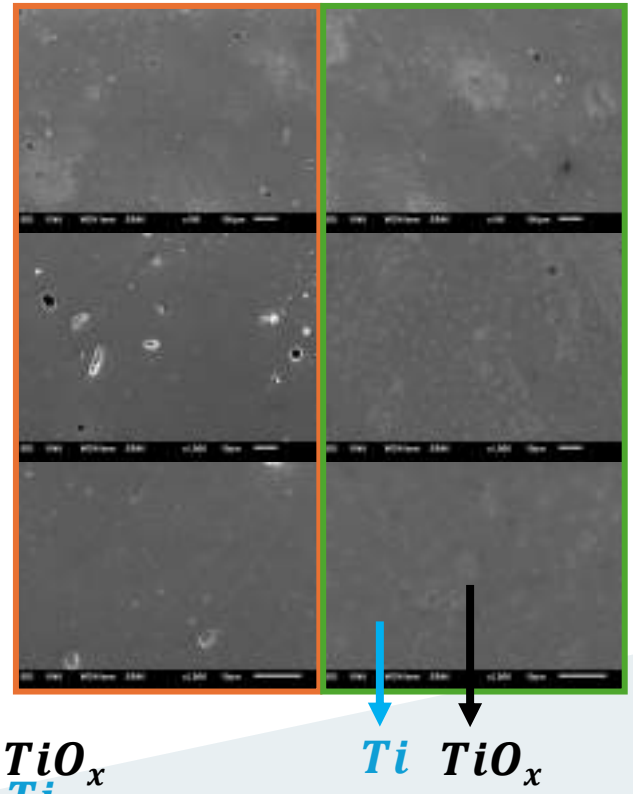
1100 ºC 5 min



Micrografías panorámicas

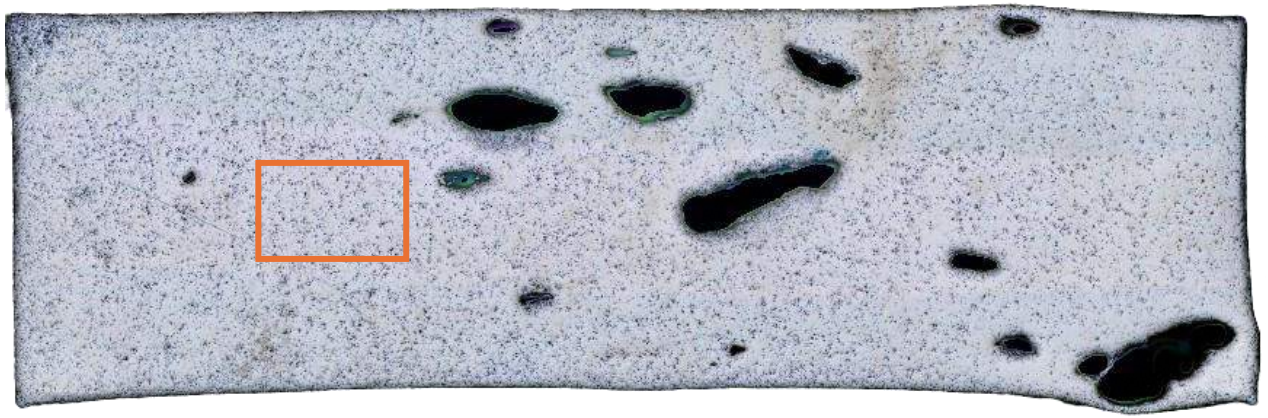
Titanio

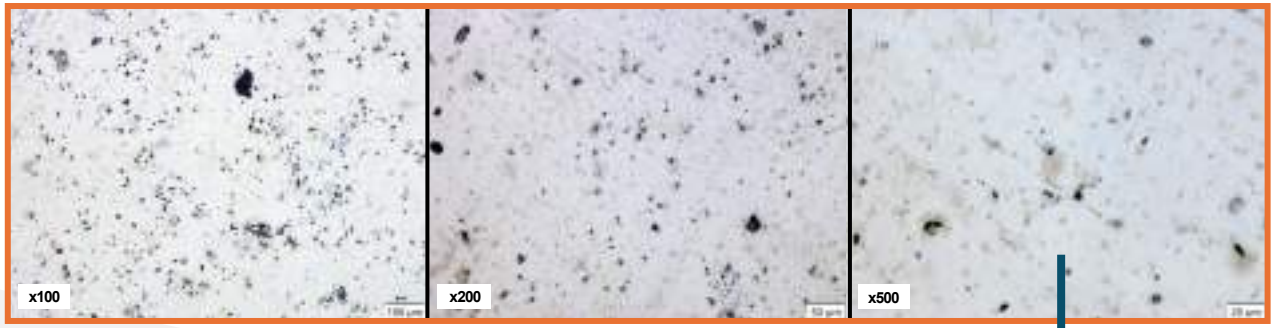




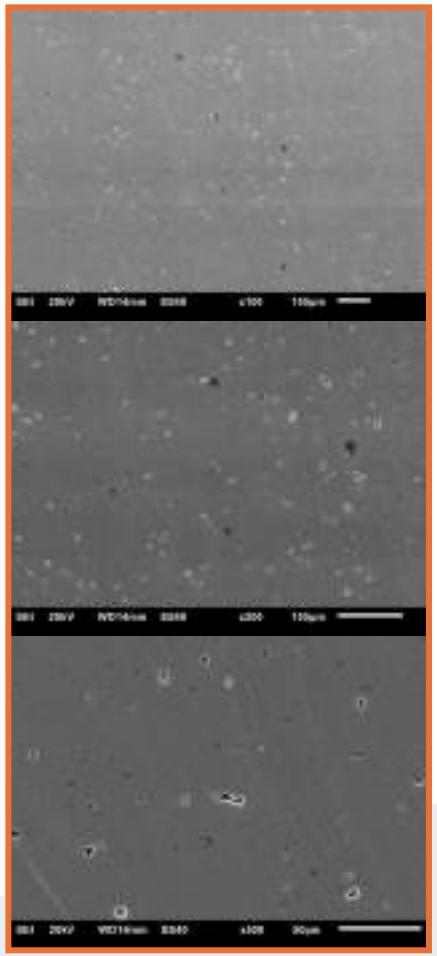
Micrografías panorámicas

87Ti-13Al



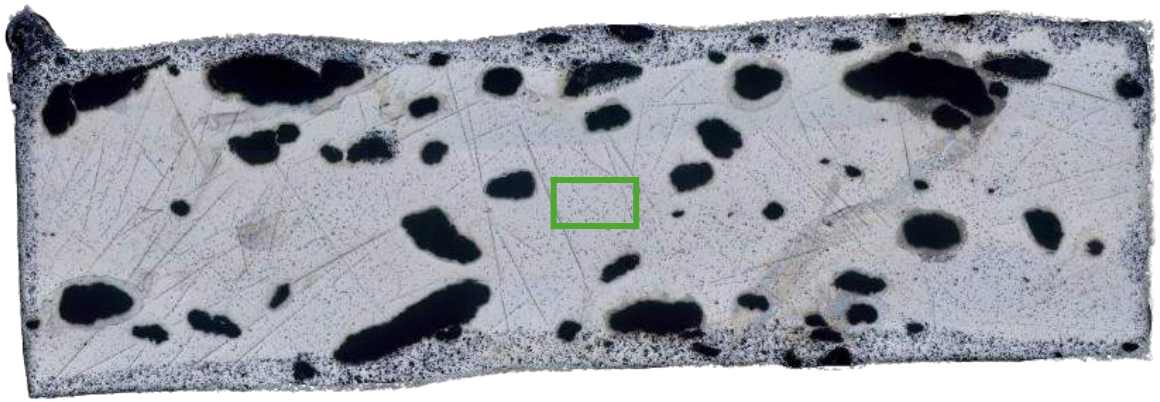


α-Ti

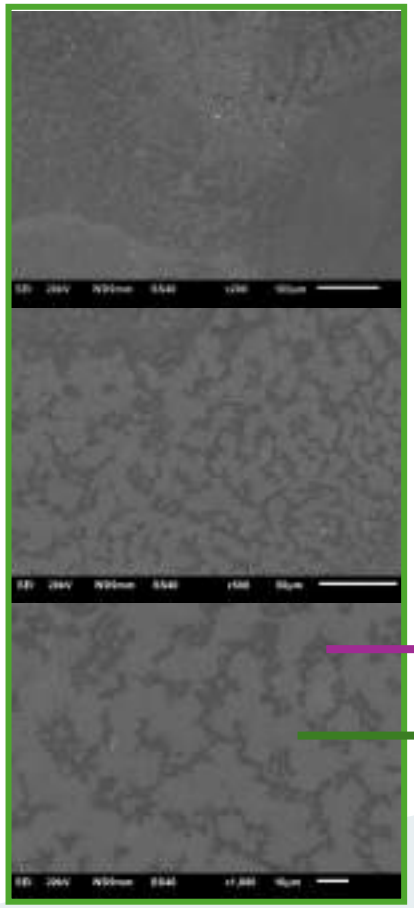


Micrografías panorámicas

75Ti-25Al

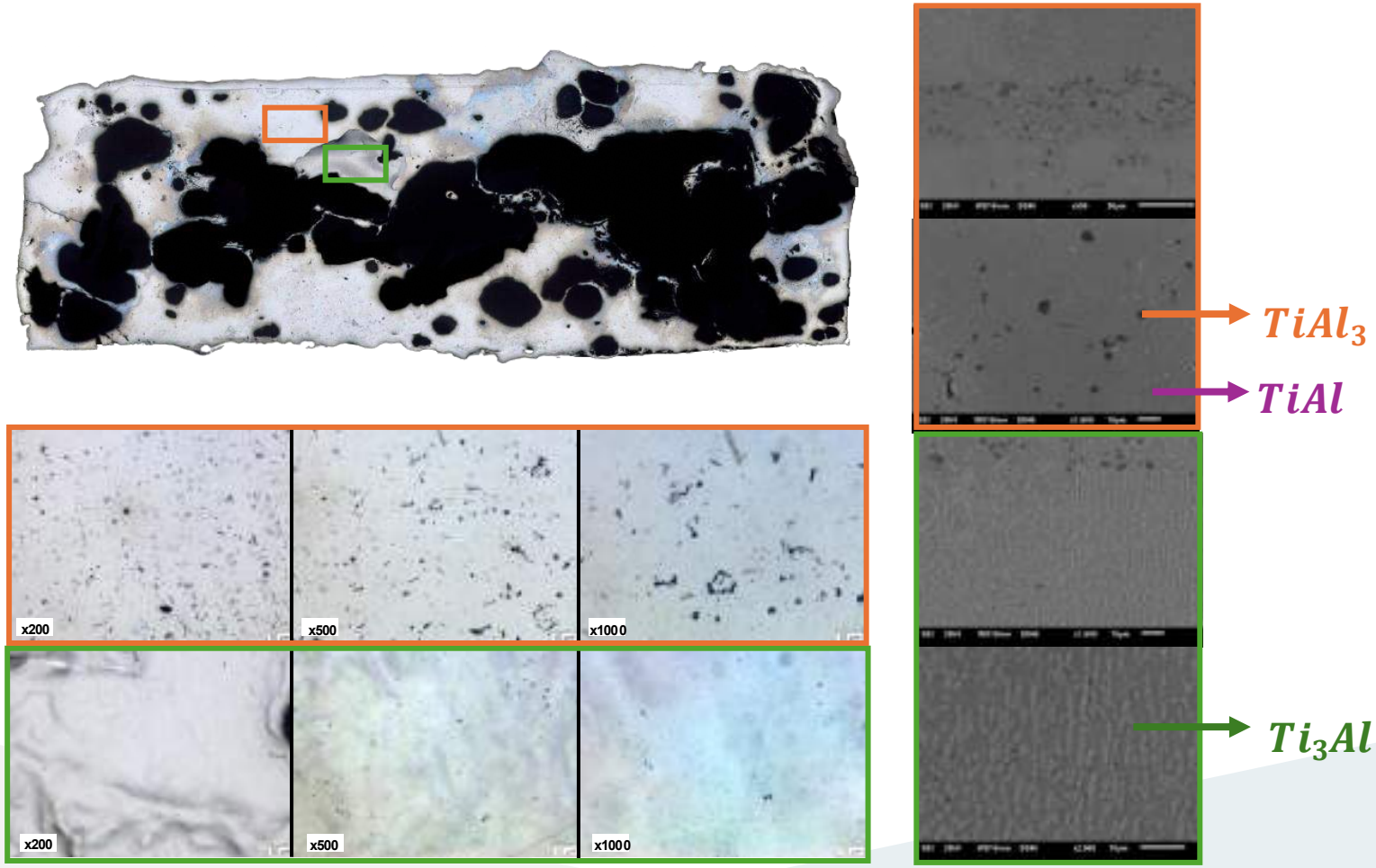




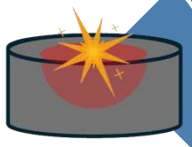


Micrografías panorámicas

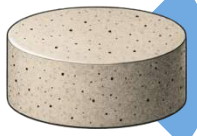
62Ti-38Al



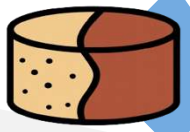
Conclusiones



Activación de reacciones SHS mediante el uso de Energía Solar Concentrada



Síntesis de intermetálicos Ti_3Al, TiAl y $TiAl_3$



Control de la microestructura mediante la modificación de la composición

Agradecimientos

- Proyecto Europeo RISEnergy (SOL-AM, n.º 823802) financiado por el programa de Investigación e Innovación de la UE Horizonte 2020
- Proyecto de Investigación Científica y Transferencia Tecnológica, JCCM, 2024–2026 (SBPLY/23/180225/000201)
- Ministerio de Ciencia e Innovación, Proyectos de Generación de Conocimiento 2022, PID2021-122491OB-I00
- Ayuda a Grupos de Investigación Consolidados de la UCLM, Vicerrectorado de Investigación, Plan Propio de Investigación de la UCLM, 2023-GRIN-34105 (2023–2025)

Síntesis de intermetálicos Ti-Al mediante sinterización solar reactiva

A. Sánchez Romero[1], A. Romero Gutiérrez[1], G.P. Rodríguez Donoso[2], A. Cañadilla Sánchez[1]

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

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

Abraham.Sanchez@uclm.es