

Uso de reacciones SHS activadas con Energía Solar Concentrada en la síntesis y nitruración de intermetálicos Ti-Al

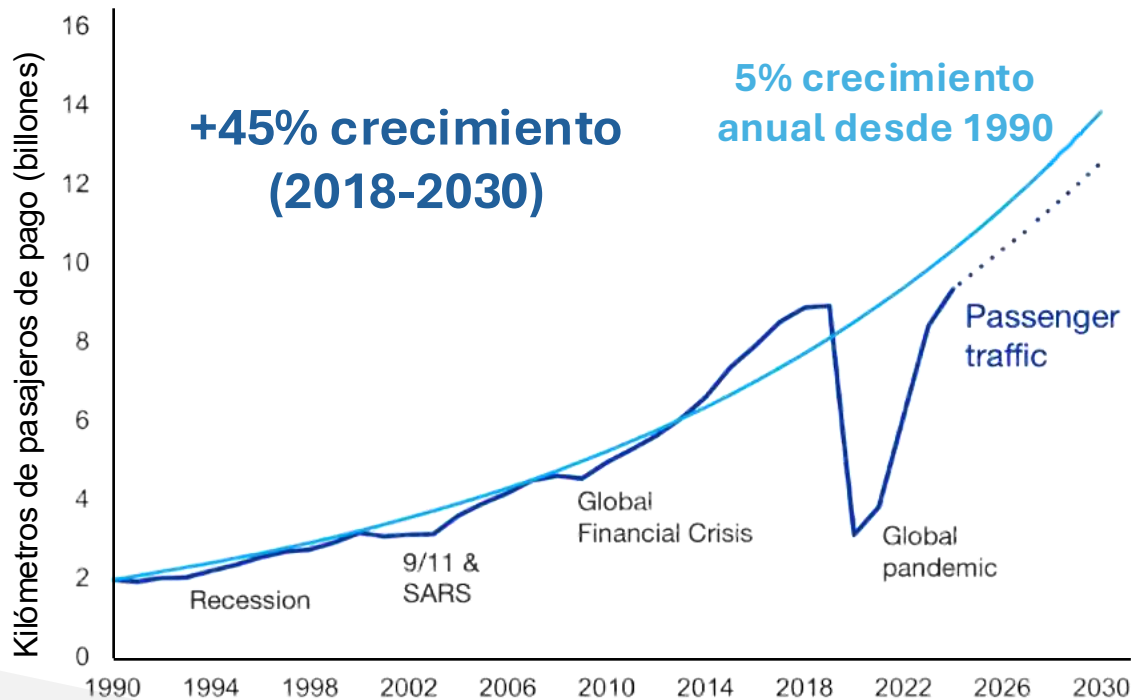
A. Sánchez Romero¹, G.P. Rodríguez Donoso², A. Romero Gutiérrez¹, A. Cañadilla Sánchez¹

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 (ETSI), Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), UCLM, Ciudad Real, España

Abraham.Sanchez@uclm.es

Impacto de la aviación



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

Datos del 2024

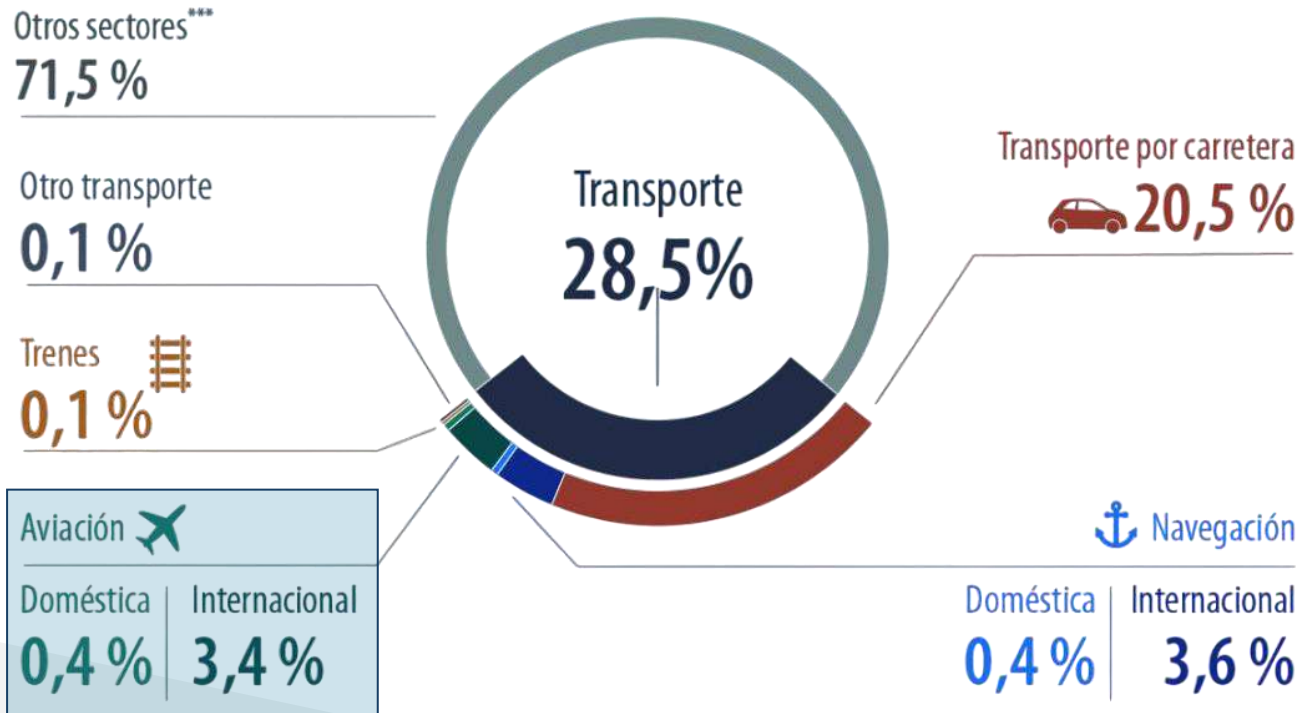
↑ 2.7% PIB a nivel mundial

4.8 mil millones de pasajeros

83.5% factor de ocupación

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

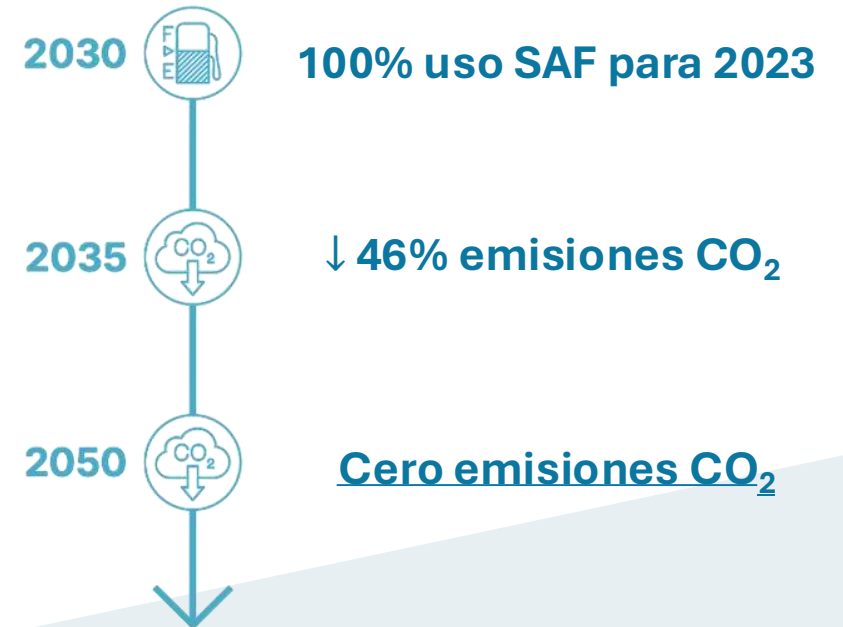
Camino hacia el carbono cero



Fuente: Agencia Europea del Medioambiente (2022)

Plan estratégico OACI 2026-2050

Aviación sostenible. Cero emisiones 2050



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



Hidrógeno como combustible

Distribución de masas



1/3

Combustible

1/3

Materiales

1/3

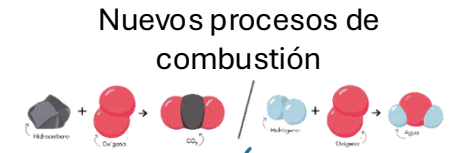
Tripulación

Indirectas

 Pacto verde
Europeo 2050

Procesos de fabricación Sostenibles

La industria
manufacturera
genera gases de
efecto invernadero



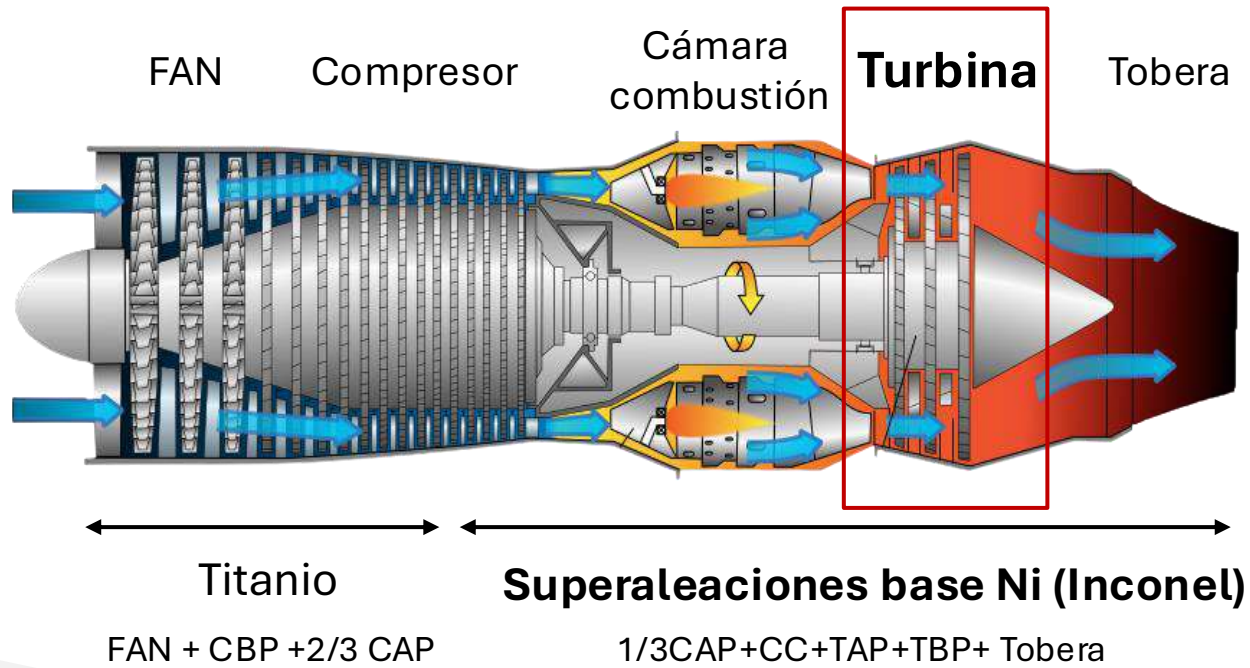
Tecnologías
limpias de
procesado



Mayor rendimiento
Menor peso

Fuente: Kalfrisa

Materiales para turbinas de motor



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 Superaeaciones

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

	<u>Ti-Al Intermetálico</u>	<u>Inconel</u>
Temperatura máxima de operación (°C)	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 ₂ O ₃	Muy alta
Dureza superficial	Alta	Alta
Coste	Medio	Alto

TiAl vs Superales



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.

Formación de capas nitruradas



Modificación superficial del material

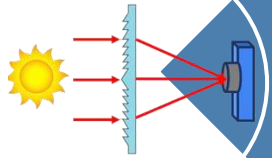
- Aumento de dureza: Mayor resistencia al desgaste frente partículas abrasivas
- Mayor resistencia a la oxidación y corrosión: Barrera frente a la difusión del oxígeno y protección erosión-corrosión
- Elevada conductividad térmica: Eficiente disipación del calor

Aumenta vida útil

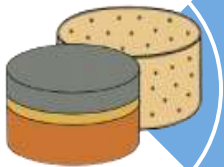
Trabajos previos:

[1] G.P, Rodríguez; G, Herranz; A, Romero *Applied Surface, Science Solar gas nitriding of Ti6Al4V alloy*, **2013**, 283, 445-452.

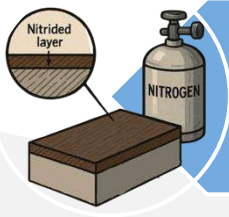
Objetivos



Uso de la energía solar concentrada para la activación de reacciones exotérmicas y el procesamiento de materiales avanzados



Síntesis de intermetálicos del sistema Ti-Al

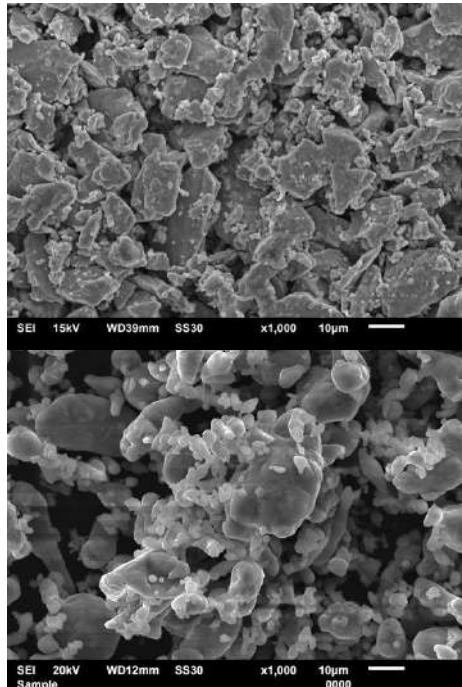


Nitruración de intermetálicos Ti-Al para la modificación superficial de sus propiedades

Metodología

Titanio

Aluminio



Tamaño de partícula < 45 μm

Mezclado



Compactación



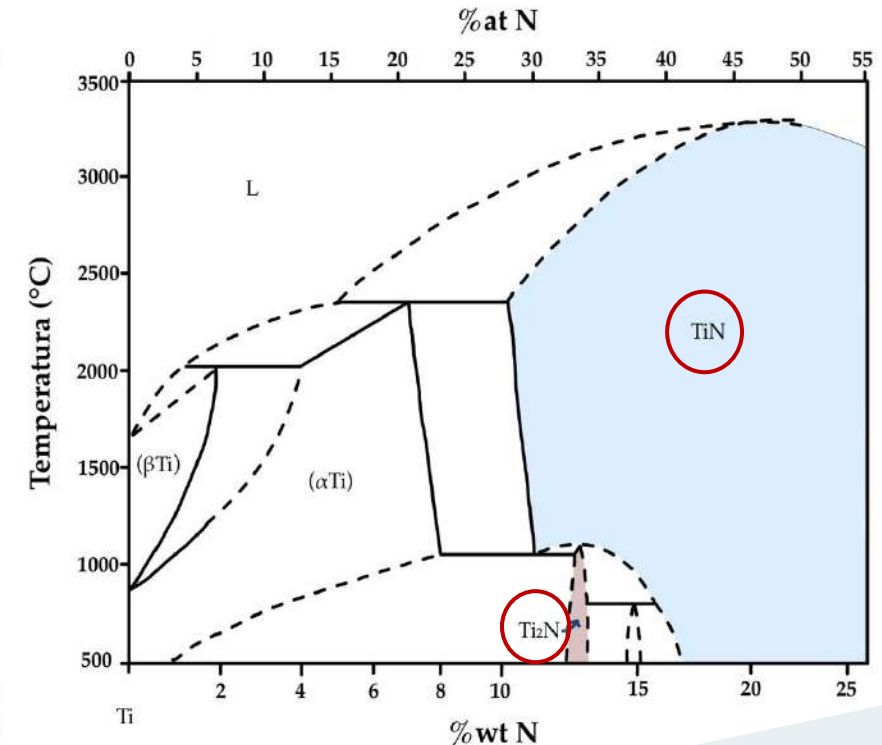
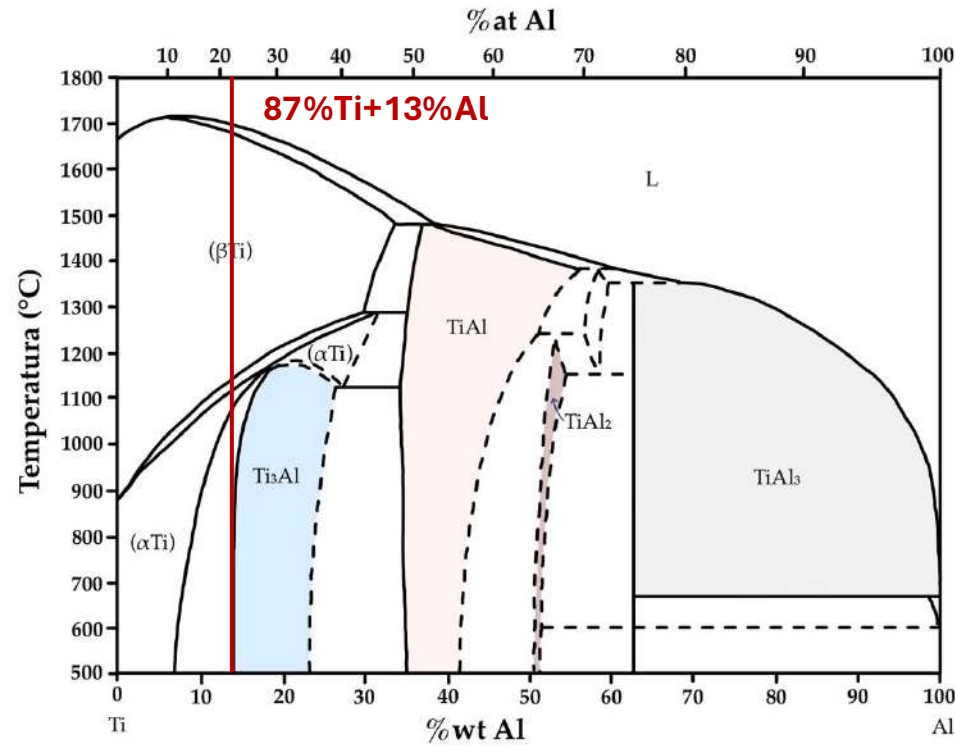
Sinterización Solar



Sistemas fabricados

Monocapa	Multicapa
Titanio	Ti/87Ti-13Al/Ti
	
87Ti-13Al	
	
Atmósfera	
$N_2 - 2H_2$	

Composiciones expresadas en %wt



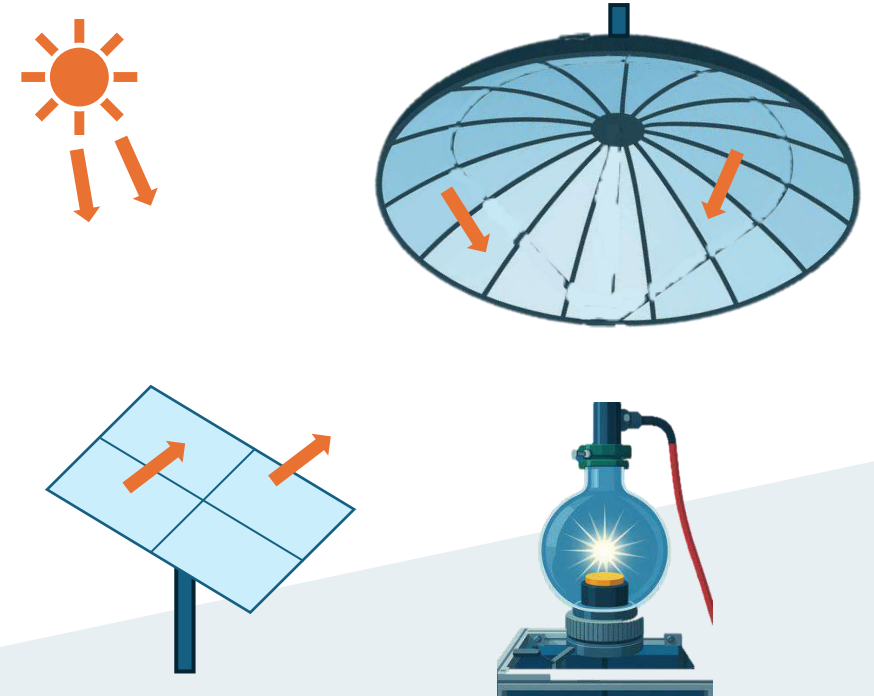
Energía Solar Concentrada (ESC)



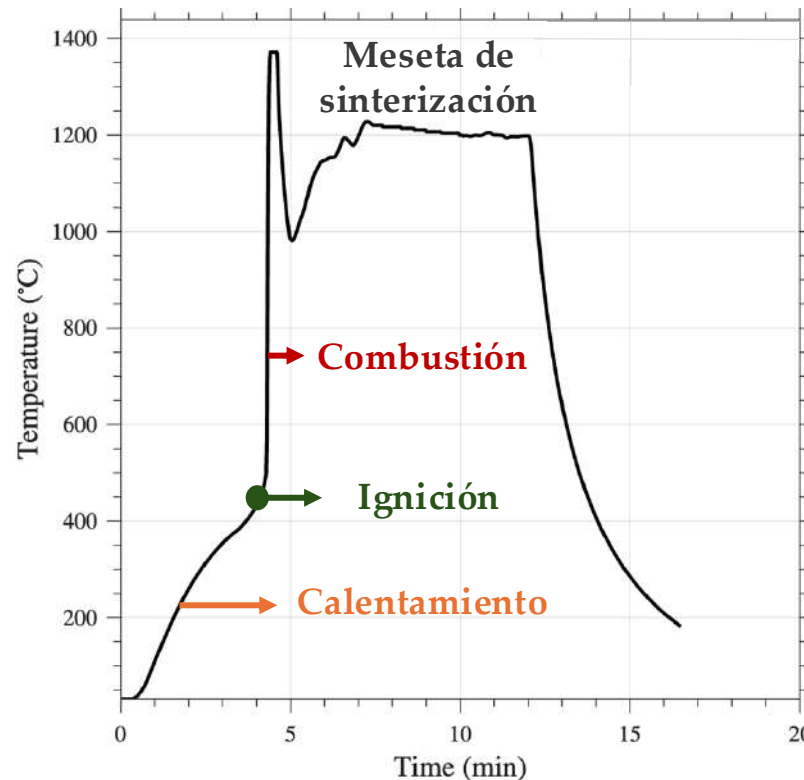
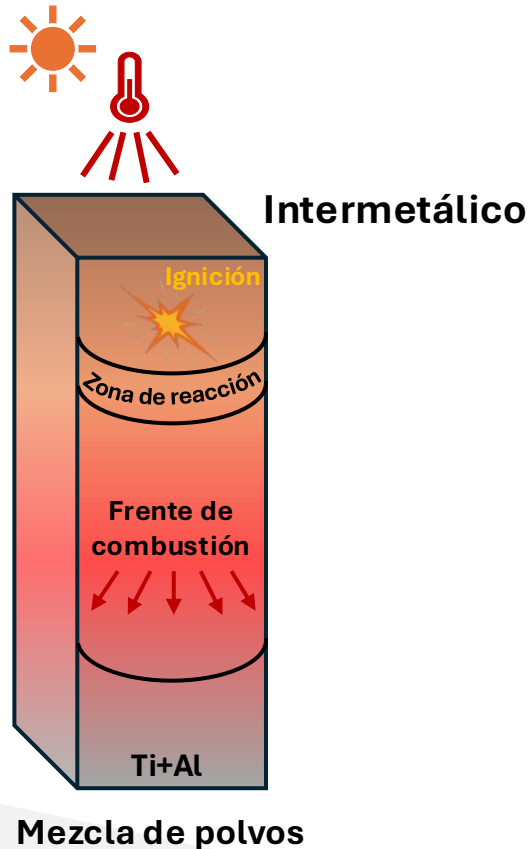
Horno solar de Odeillo: PROcédés Matériaux et Energy Solaire (Promes-CNRS)



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



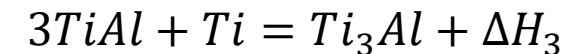
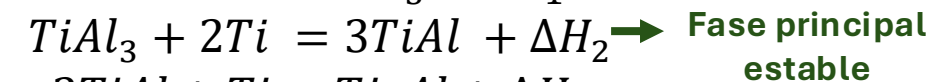
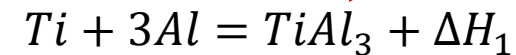
Síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS)



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



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

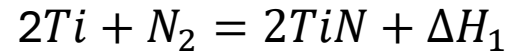
Fuente:

[3] 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.

Trabajos previos:

[2] 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.

Reacciones de nitruración

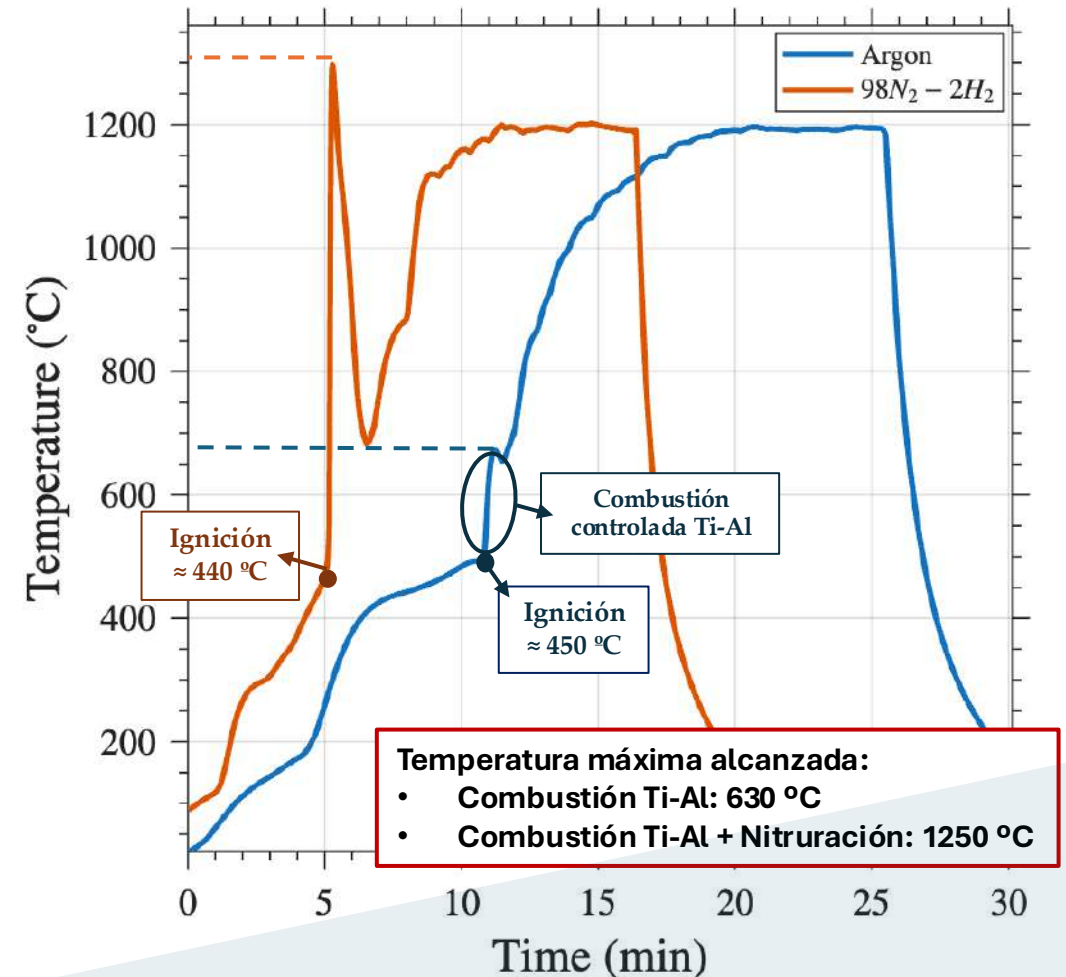


$$\Delta G_f(TiN) = -203553 + 65,29 \left(\frac{J}{mol} \right)$$

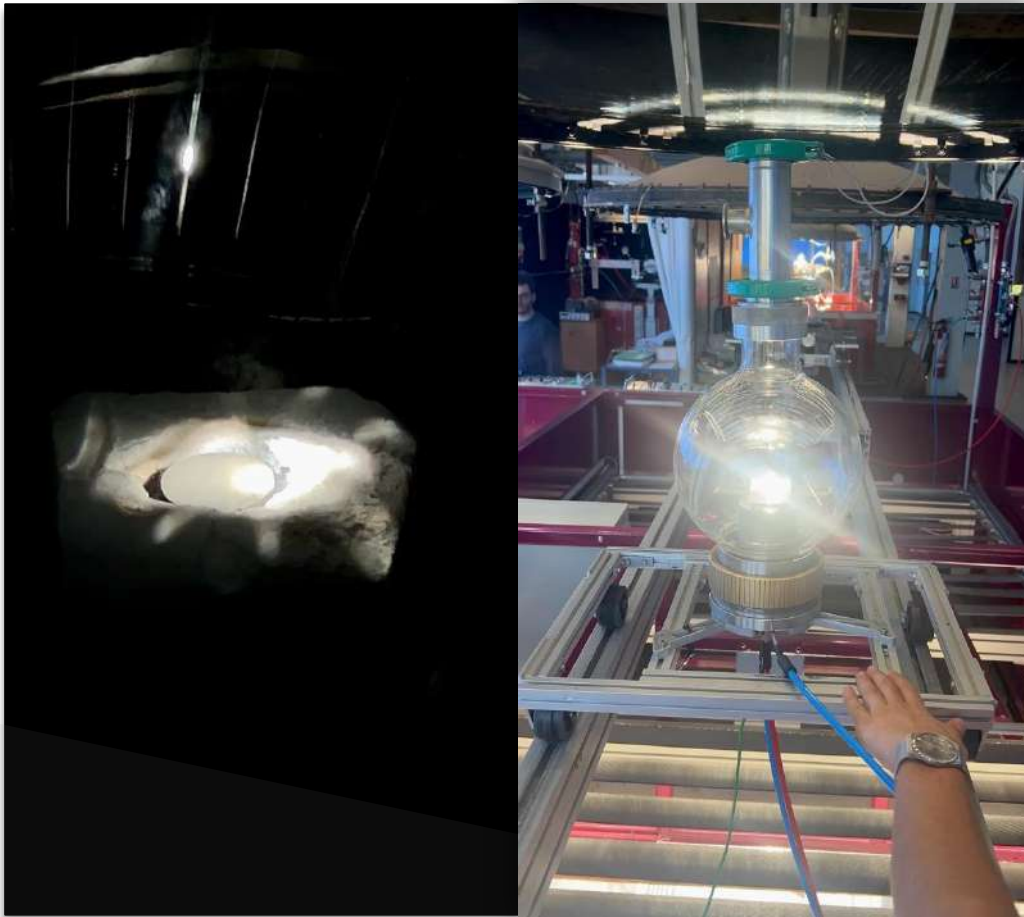
Un orden de magnitud mayor que la energía liberada en la reacción SHS entre Ti-Al

Condiciones de ensayo 1200 °C 5 min:

Concentrador parabólico	2 metros diámetro
Diámetro del foco (mm)	20
Irradiación solar (W/m ²)	913-1014
Apertura persiana(%)	28-39
Potencia en el foco (W/cm ²)	75-115



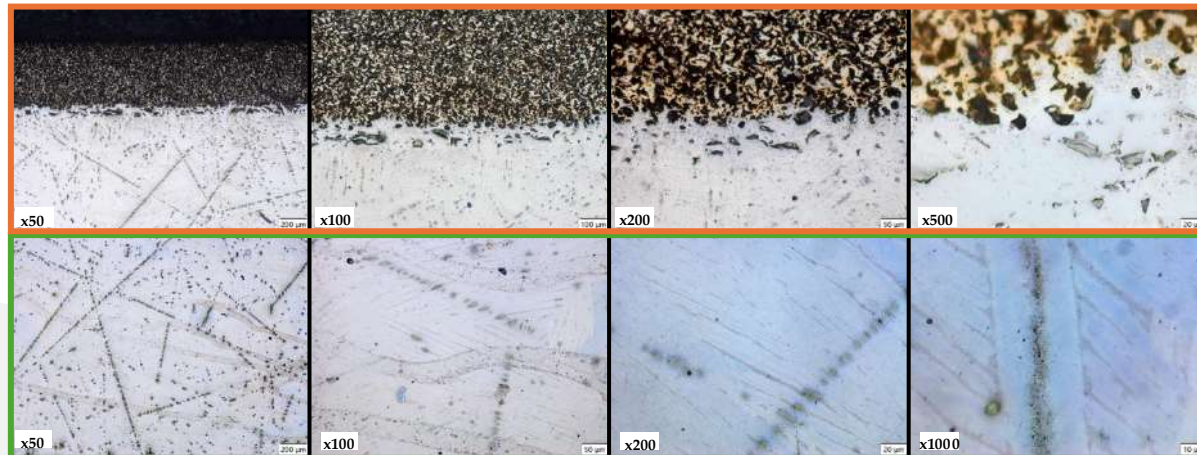
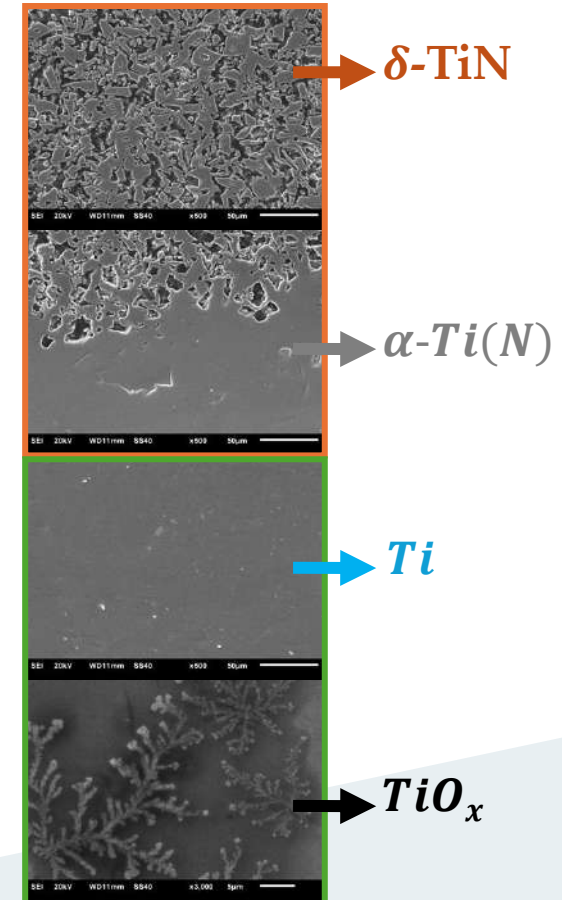
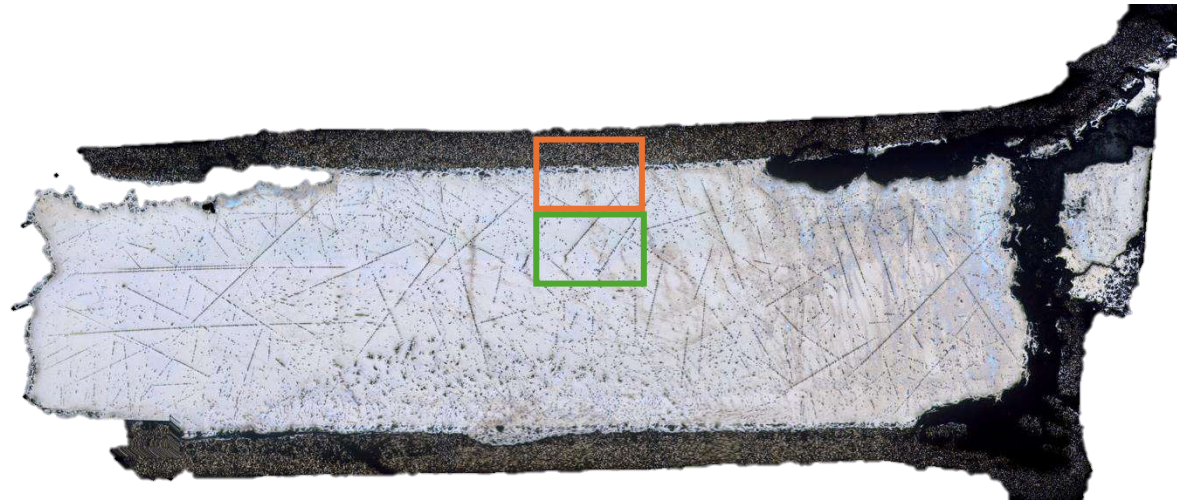
Macrografías



1200 °C 5 min

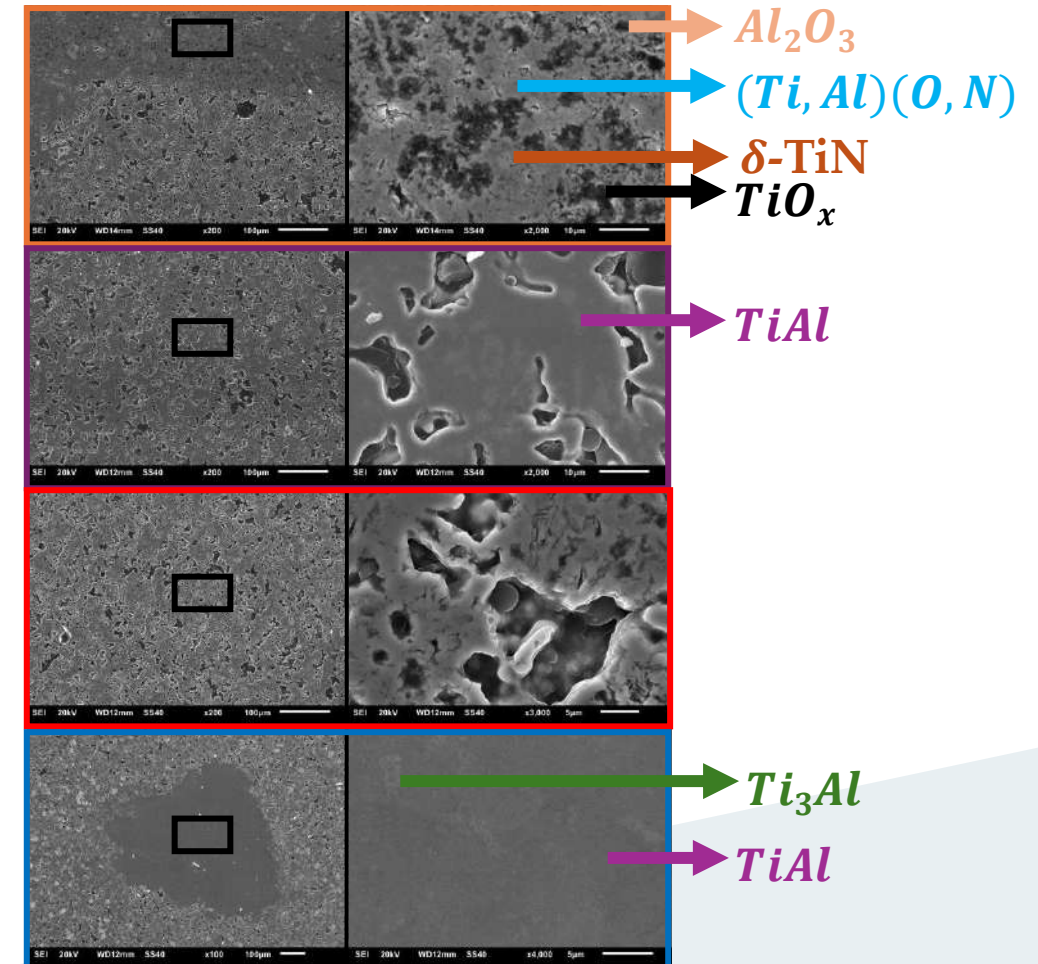
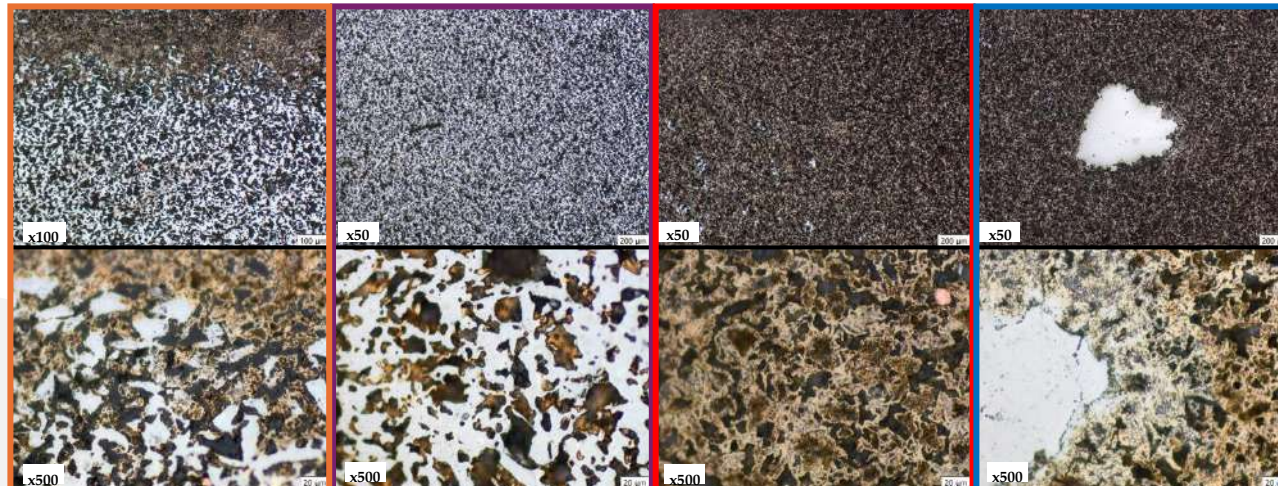
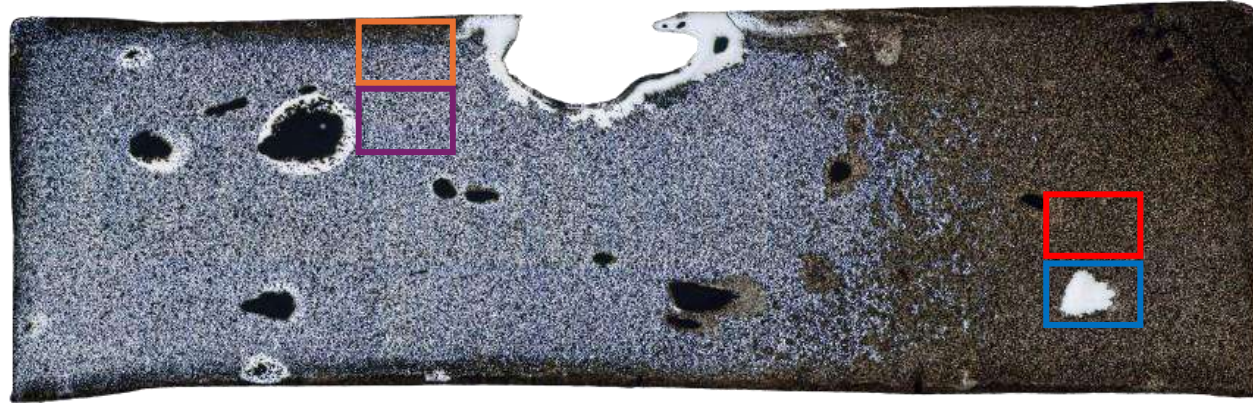
Micrografías panorámicas

Titanio



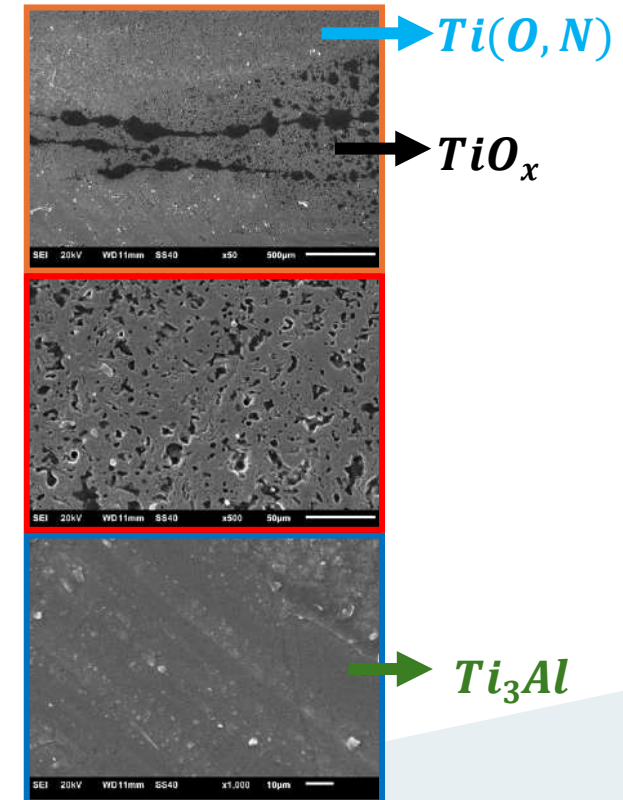
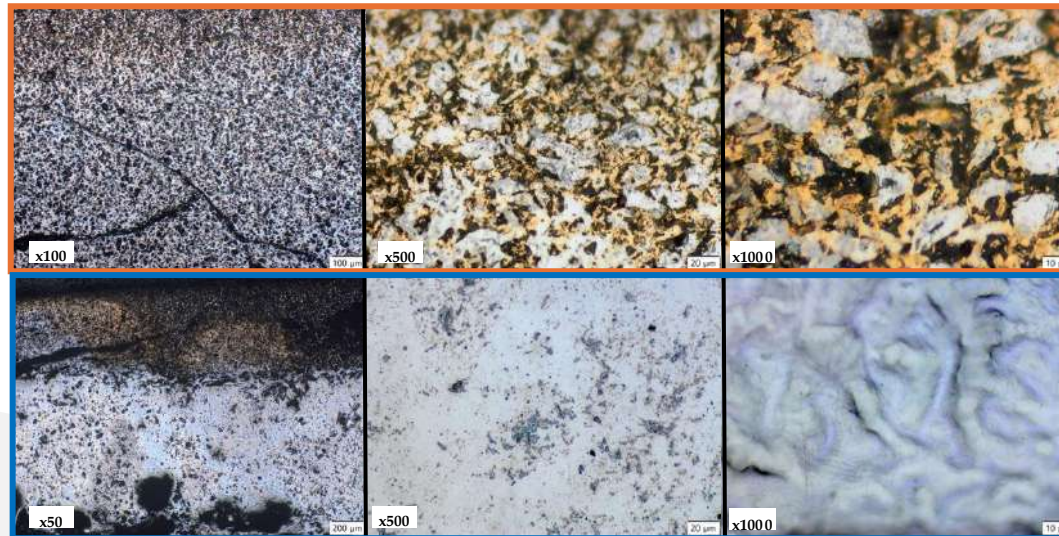
Micrografías panorámicas

87Ti-13Al



Micrografías panorámicas

Ti/87Ti-13Al/Ti



Conclusiones



Agradecimientos

- Proyecto Europeo RISEnergy (n.º 823802, SOL-AM) 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)

Uso de reacciones SHS activadas con Energía Solar Concentrada en la síntesis y nitruración de intermetálicos Ti-Al

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

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 (ETSI), Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), UCLM, Ciudad Real, España

Abraham.Sanchez@uclm.es