



MMCs reforzados por partículas

Materiales Compuestos
2003-04

MMCs reforzados por partículas

- Introducción
- Partículas de refuerzo
- Propiedades mecánicas
 - Módulo elástico
 - Resistencia
 - Elongación
 - Tenacidad
 - Fatiga
 - Fluencia lenta
- Comportamiento térmico

Introducción

- Desarrollo refuerzos fibras largas frenado por coste materiales y complejidad rutas fabricación
- Ventajas refuerzos partículas
 - Bajo coste
 - Alta rigidez y resistencia
 - Resistencia al desgaste
 - Fabricación más sencilla
- Las propiedades mecánicas dependen del refuerzo, la ruta de fabricación y los posibles tratamientos posteriores
- Las matrices más empleadas son Al, Mg y Ti

Introducción

■ Aspectos comerciales

Table 5 Finished component cost factors for an extruded wrought product

Extrusion billet cost
 Material
 Sawing
Extrusion cost
 Extrusion speed
 Die cost
 Die wear
 Recoveries
Cutting
Machining
Bending and forming
Welding
Surface finishing – anodising or painting
Transportation
Recycling

Partículas de refuerzo

- Gran variedad de partículas cerámicas. Para seleccionar un refuerzo se debe considerar:
 - Aplicación:
 - Estructural:
 - Alto módulo y resistencia
 - Baja densidad
 - Forma de la partícula (si es angulosa, concentración de tensiones)
 - Térmica:
 - Coeficiente de expansión y conductividad (tensiones residuales y distorsiones)

Partículas de refuerzo

■ Selección

□ Ruta de fabricación

■ Metalurgia de polvos

- Mezcla homogénea: relación entre tamaño de partículas (SiC/Al, 0.7/1, Al=20-40 μm , partículas=3-20 μm)
- Fractura partículas (relación de forma, densidad de defectos)

■ Metal fundido

- Reacción matriz-partícula: SiC inestable en Al y estable en Mg, Al_2O_3 al contrario
 - Tamaño partícula: las grandes se segregan por gravedad, las finas incrementan la viscosidad dificultando el proceso.
 - Se emplean partículas 10-20 μm
- Coste. Disponibilidad en cantidad, tamaño y forma (5\$/kg)

Partículas de refuerzo

- Las partículas más empleadas son SiC y Al₂O₃

Partícula	E (GPa)	ν	ρ (g/cm ³)	α (K ⁻¹)	K (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
SiC	420-450	0.17	3.2	4.3x10 ⁻⁶	10-40 a 1100°C
Al ₂ O ₃	380-450	0.25	3.96	7.0x10 ⁻⁶	5-10 a 1000°C

Propiedades mecánicas.

Módulo elástico

- Dificultad en la medida
 - Depende del método empleado (estático, dinámico, tracción/compresión)
 - Tensiones residuales
 - Inhomogeneidades, plasticidad local
 - Incertidumbre E partículas

Propiedades mecánicas.

Módulo elástico

■ Ley de mezclas

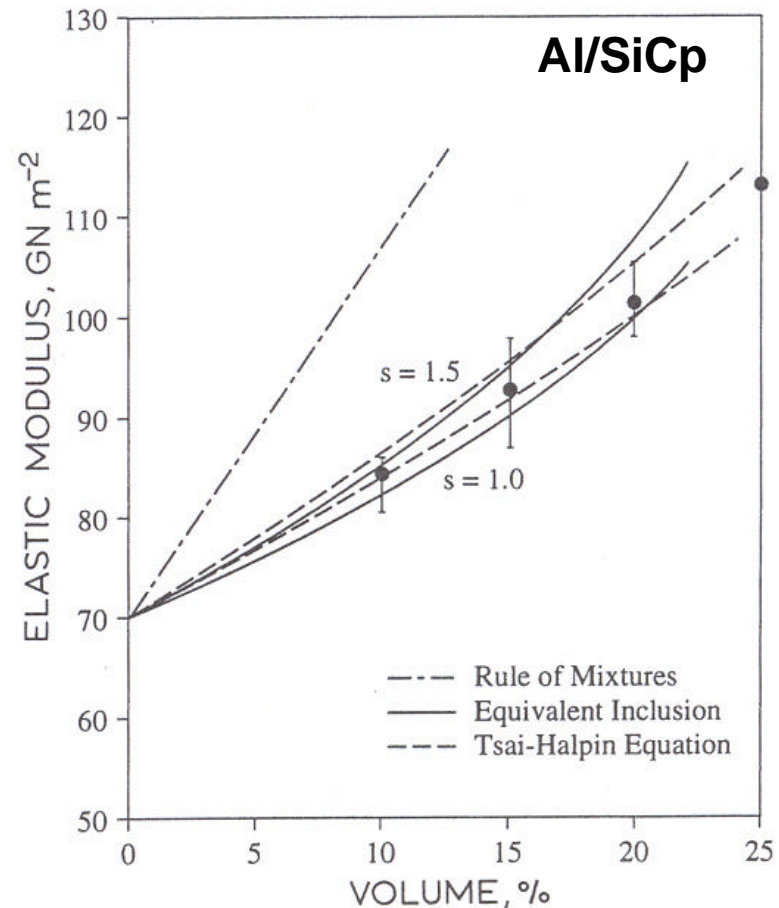
$$E_c = V_p E_p + V_m E_m$$

■ Halpin-Tsai

$$E_c = \frac{E_m (1 + 2sqV_p)}{1 - qV_p}$$

$$q = \frac{\left(\frac{E_p}{E_m} - 1 \right)}{\frac{E_p}{E_m} + 2s}$$

■ Eshelby



Propiedades mecánicas.

Módulo elástico

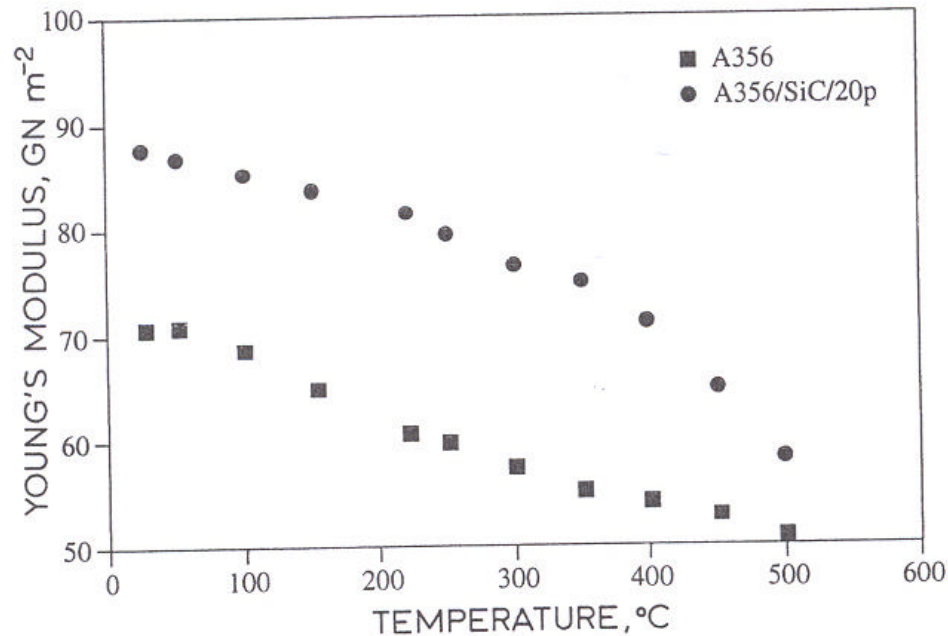
■ E depende de:

□ V_p

□ s

□ Distribución de partículas

■ La mejora en E se mantiene a altas temperaturas



Propiedades mecánicas.

Resistencia

- Para Al/SiCp: hasta 60% aumento en s_Y y s_{UTS} en función de
 - V_p
 - Composición matriz
 - Tratamientos térmicos
- Resultados experimentales con mucha dispersión (calidad material y fabricación)
- s_Y : problema en su determinación ($e=0.2\%$) por alto endurecimiento MMCs para deformaciones pequeñas

Propiedades mecánicas.

Resistencia

Table 2 Typical properties of some commercially available metal matrix composites

Composite*	YS,† MN m ⁻²	UTS, MN m ⁻²	Elongation, %	Elastic modulus, GN m ⁻²	Supplier
Wrought					
Al-Mg ₂ Si					
6061/Al ₂ O ₃ /10p (T6)	296	338	7.5	81	Duralcan, Alcan
6061/Al ₂ O ₃ /15p (T6)	317	359	5.4	87	Duralcan, Alcan
6061/Al ₂ O ₃ /20p (T6)	359	379	2.1	98	Duralcan, Alcan
6061/Al ₂ O ₃ /20p (T6)	305	330	3.4	85	Comral 85, Comalco
6061/SiC/15p (T6)	342	364	3.2	91	Cospray, Alcan
6061/SiC/15p (T4)	405	460	7.0	98	DWA‡
6061/SiC/20p (T4)	420	500	5.0	105	DWA‡
6061/SiC/25p (T4)	430	515	4.0	115	DWA‡

Table 3 Typical unreinforced alloy properties

Alloy	YS,* MN m ⁻²	UTS, MN m ⁻²	Elongation, %	Elastic modulus, GN m ⁻²
6061 (T6)	275	310	20	69
2014 (T6)	476	524	13	73
2124 (T6)	325	470	12	72

Propiedades mecánicas.

Resistencia

- Resistencia de un MMC según modelo shear-lag:

$$\sigma_c = \left(\frac{V_p \sigma_m s}{4} \right) + V_m \sigma_m$$

- Problemas ecuación:
 - Resistencia subestimada para s empleados (incluir efecto tensión no nula en los extremos)
 - Se desprecia la influencia de las partículas en los micromecanismos de deformación
 - Elevado endurecimiento a bajas deformaciones
 - Modificación microestructural (tamaño de grano y densidad de dislocaciones)

Propiedades mecánicas.

Resistencia

- Micromecánica. Mecanismos de endurecimiento
 - Orowan
 - Tamaño de grano y subgrano
 - Tratamientos térmicos. Dislocaciones generadas durante el enfriamiento para acomodar $\Delta\alpha$
 - Endurecimiento por desajuste en deformación entre las partículas elásticas y la matriz plástica
- La importancia de cada mecanismo dependerá de la microestructura y fabricación de cada MMC

Propiedades mecánicas.

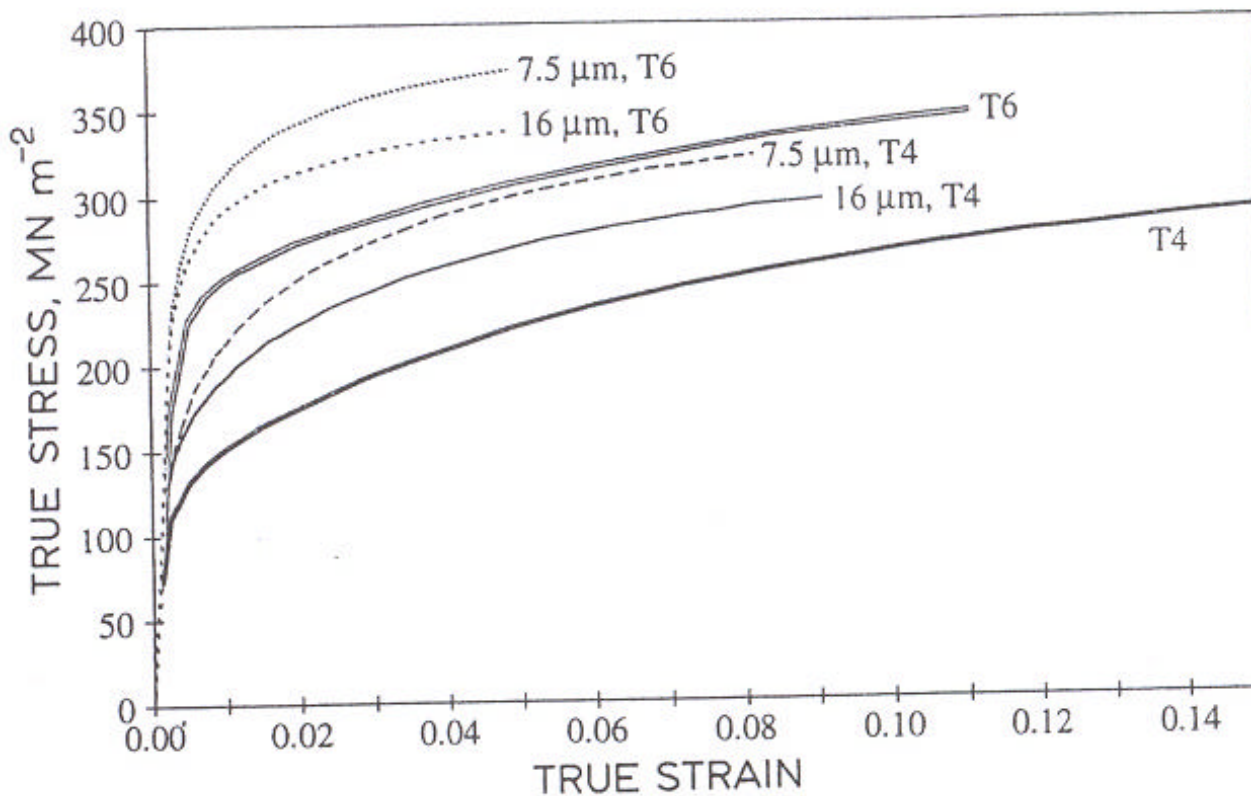
Resistencia

- Tamaño de grano:
 - Polvos: granos pequeños, alta resistencia
 - Metal fundido: granos grandes, no mejora resist.
- Orowan: no afecta para partículas $>5\mu\text{m}$
- Tratamientos térmicos y endurecimiento por deformación sí para partículas $>5\mu\text{m}$
- Resumen: la resistencia dependerá más de V_p que del tamaño de grano. A esto se suma el endurecimiento de la matriz por precipitados.
- Atención, es necesario siempre tener una intercara fuerte

Propiedades mecánicas.

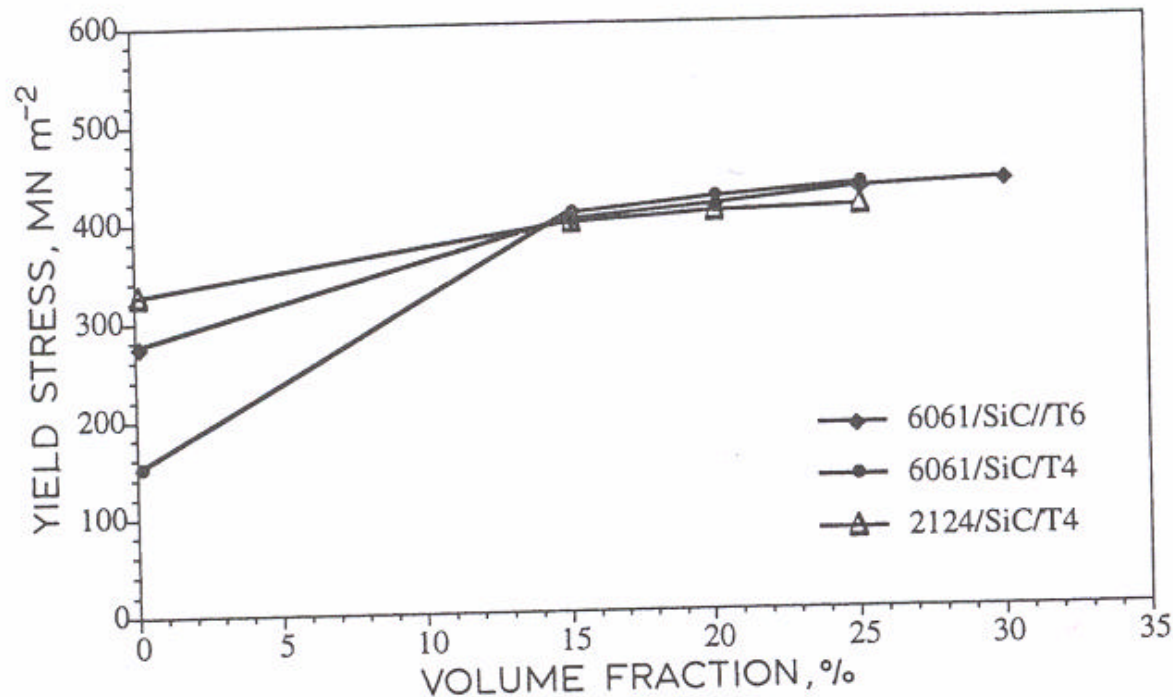
Resistencia

A356/SiC/15p, dos tratamientos térmicos



Propiedades mecánicas.

Resistencia

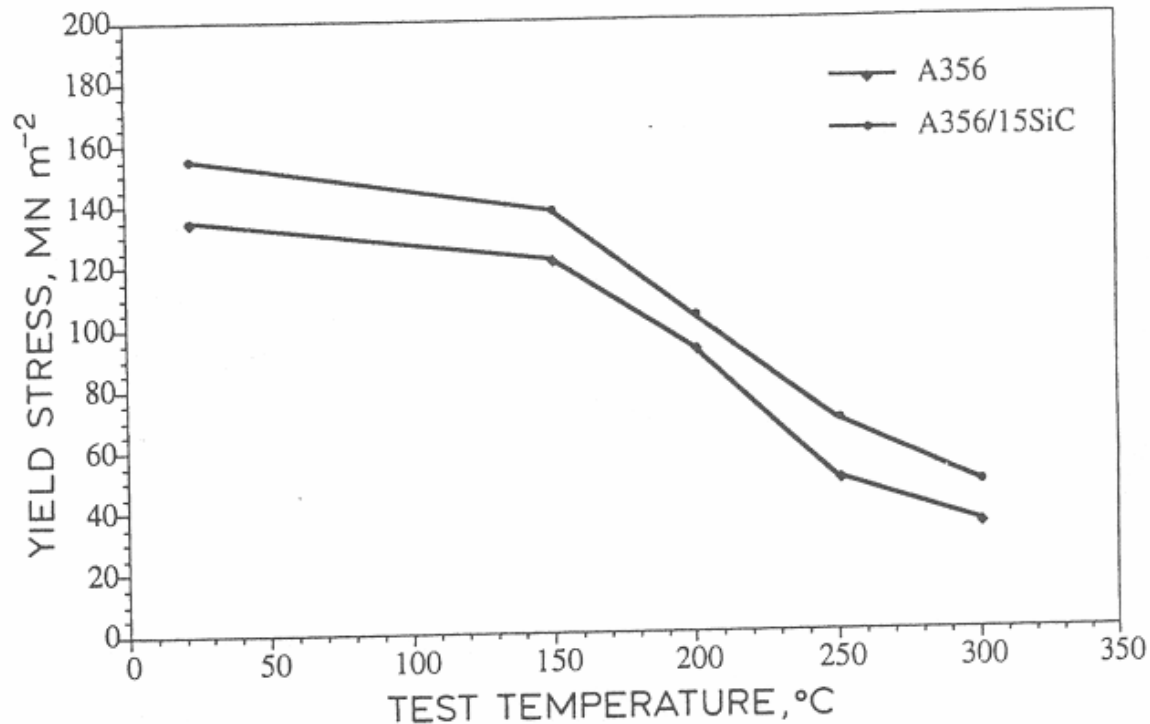


Fabricado por metalurgia de polvos. Importancia V_p

Propiedades mecánicas.

Resistencia

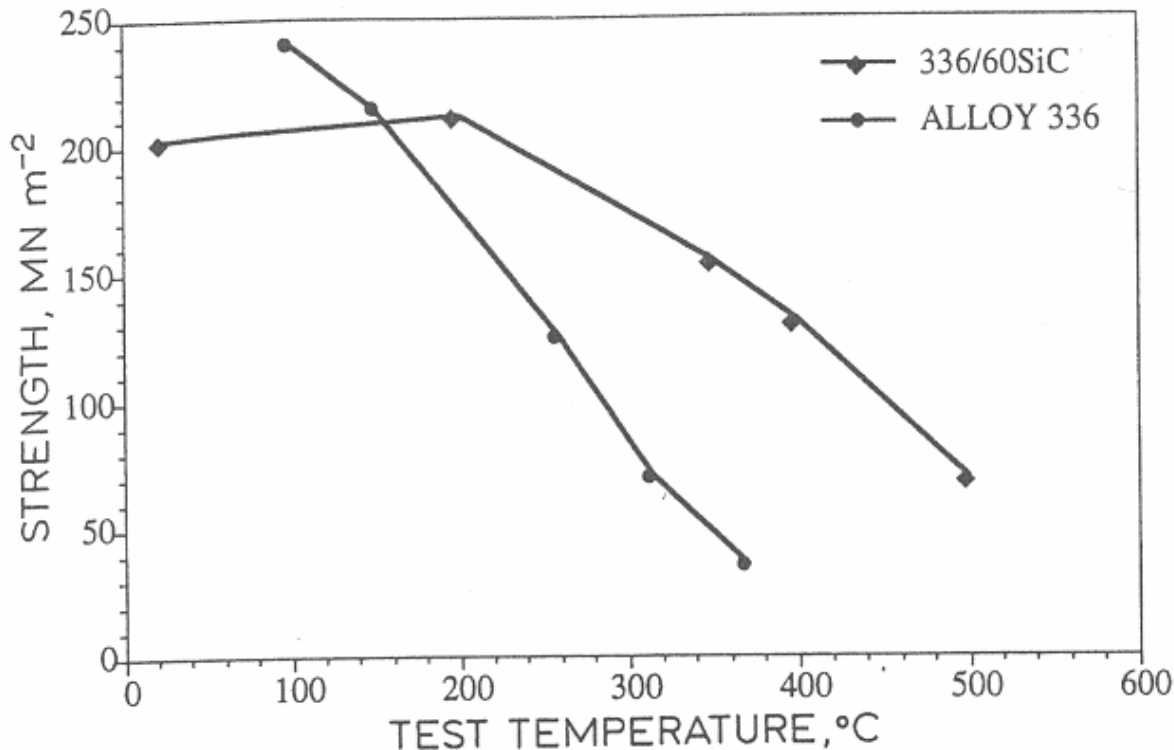
Resistencia a alta temperatura en MMCs



Propiedades mecánicas.

Resistencia

Resistencia a alta temperatura en MMCs

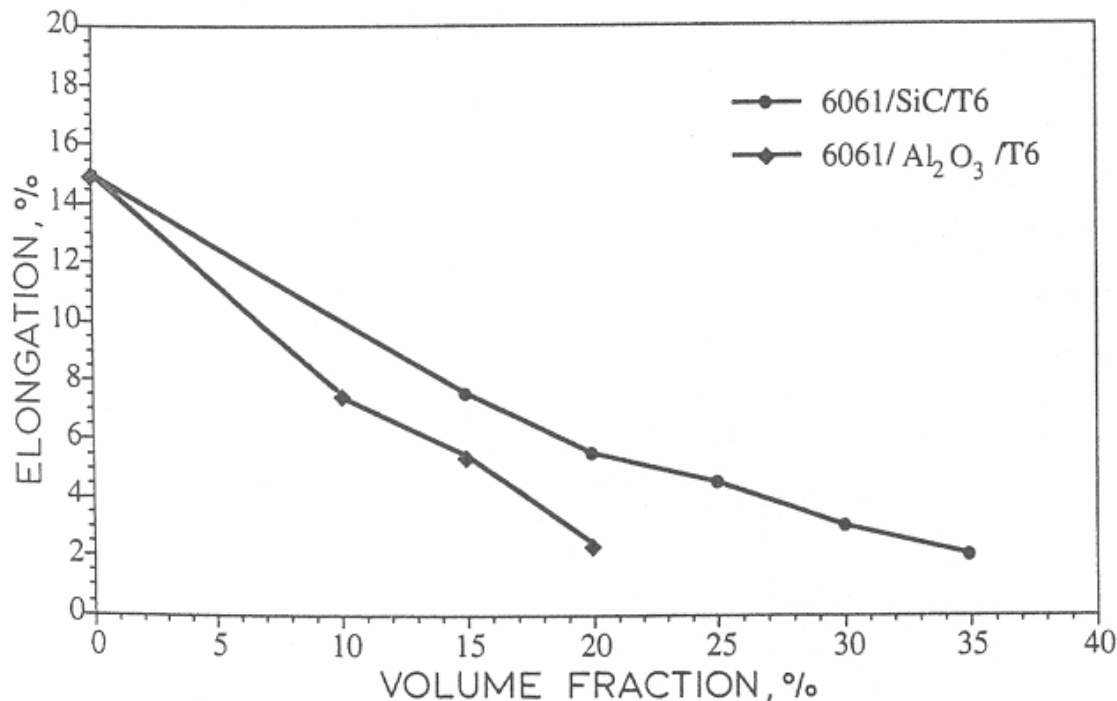


Para elevado V_p el mecanismo predominante es Orowan, el cual es independiente de la temperatura pero dependiente del módulo elástico

Propiedades mecánicas.

Elongación (ductilidad)

- Limitación más importante de los MMCs: ductilidad (\downarrow con \uparrow partículas y tiempo trat.)



Propiedades mecánicas.

Elongación (ductilidad)

- Rotura MMCs debida a:
 - Rotura de partículas. Predomina en partículas grandes
 - Mayor tensión en las partículas
 - Mayor probabilidad de defectos
 - Coalescencia de cavidades de la matriz en aglomerados de partículas
 - Mayor triaxialidad de tensiones. Deformación entre partículas elásticas muy restringida si el espaciado es pequeño

Propiedades mecánicas.

Elongación (ductilidad)

- Rotura catastrófica de partículas (Griffith):

$$\sigma_p = \left(\frac{2E_p \gamma}{\pi c} \right)^{1/2}$$

siendo σ_p la tensión en la partícula, E_p su módulo elástico, γ la energía de fractura superficial y c la longitud del defecto interno

- La tensión crítica para la nucleación de cavidades interfaciales depende de la tensión de fluencia de la matriz. En los modelos esta tensión es independiente del tamaño de la partícula, pero este tamaño influye si la distribución de las partículas depende de su tamaño

Propiedades mecánicas.

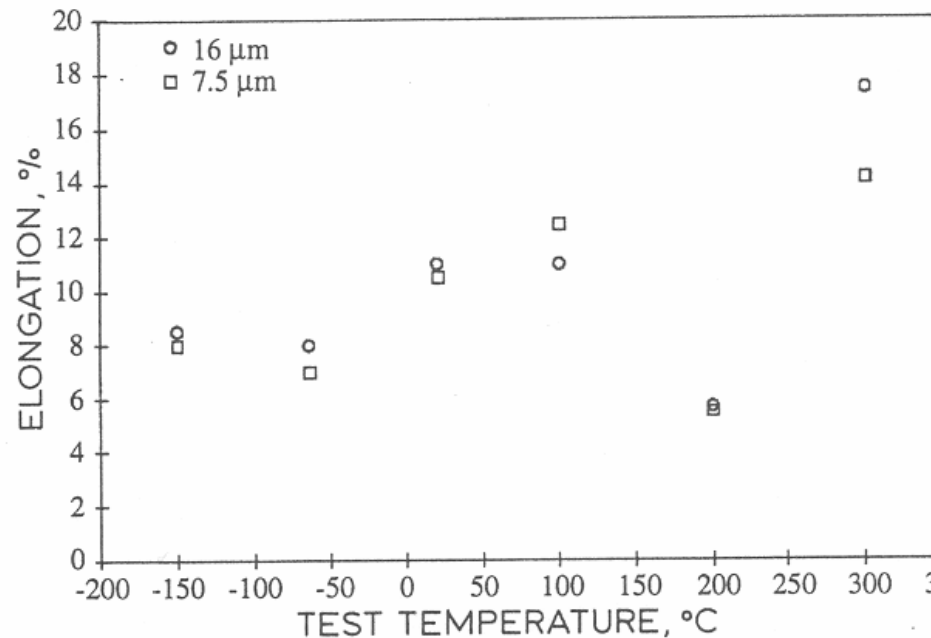
Elongación (ductilidad)

- En MMCs el crecimiento de cavidades se ve restringido por la presencia de partículas
- Thomason: para una fracción volumétrica de cavidades superior a 0.055 se produce la fractura del material sin crecimiento de cavidades $\Rightarrow V_p > 0.1$ el proceso de fractura está controlado por la nucleación de cavidades
- Generalmente se observa fractura de partículas ¿es este el mecanismo dominante?
 - se produce para pequeñas deformaciones
 - comportamientos de rotura muy diferentes no se reflejan en elongación

Propiedades mecánicas.

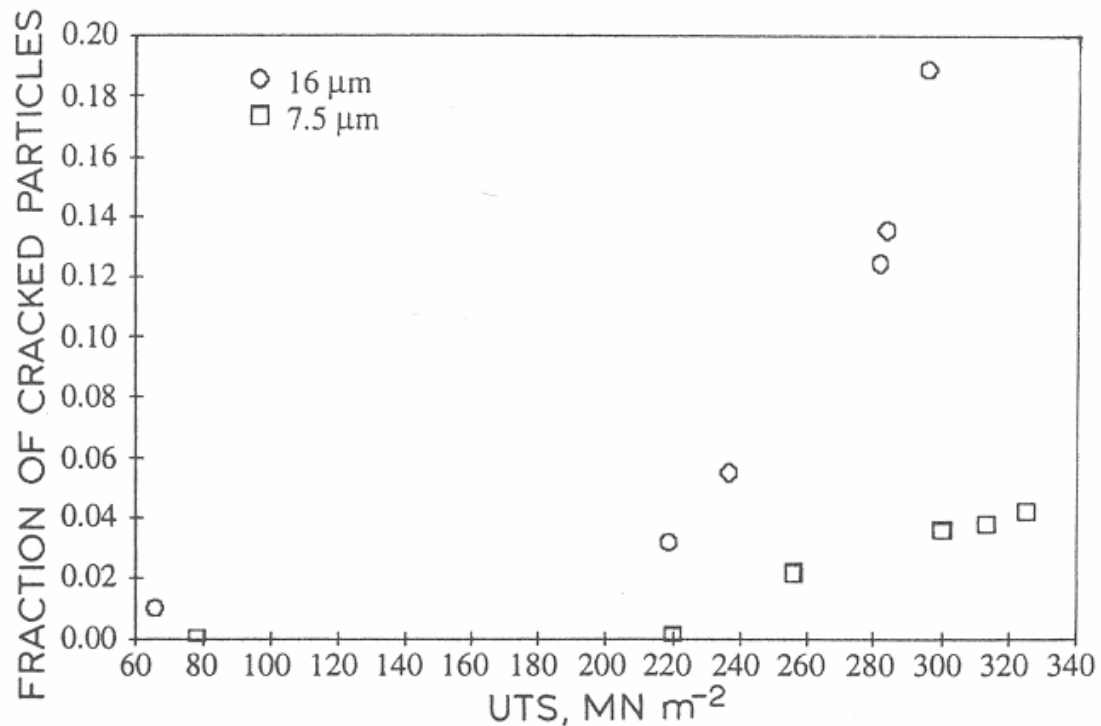
Elongación (ductilidad)

- Poca diferencia para distintos tamaños de partículas
- A 200°C: endurecimiento por precipitación durante el ensayo
- Fracción de partículas rotas mucho mayor para 16 μm
- Elongación mínima no corresponde con máxima fracción de partículas rotas



Propiedades mecánicas.

Elongación (ductilidad)



Propiedades mecánicas.

Elongación (ductilidad)

- El proceso de fractura es complejo y las hipótesis de los modelos existentes simplifican excesivamente el problema
- Para optimizar la ductilidad para una V_p dada se debe tener:
 - Distribución uniforme de partículas
 - Partículas finas ($< 10\mu\text{m}$) y con distribución de tamaño uniforme
 - Elevada resistencia de la intercara
 - Control de la forma de las partículas
 - Matriz dúctil

Propiedades mecánicas.

Tenacidad

- Disminuye sensiblemente para $V_p < 10\%$
- Menos sensible que elongación a los tratamientos térmicos
- Algunos datos sugieren que las partículas grandes mejoran la tenacidad
- Valores de tenacidad razonables (15-20 MPa.m^{1/2})

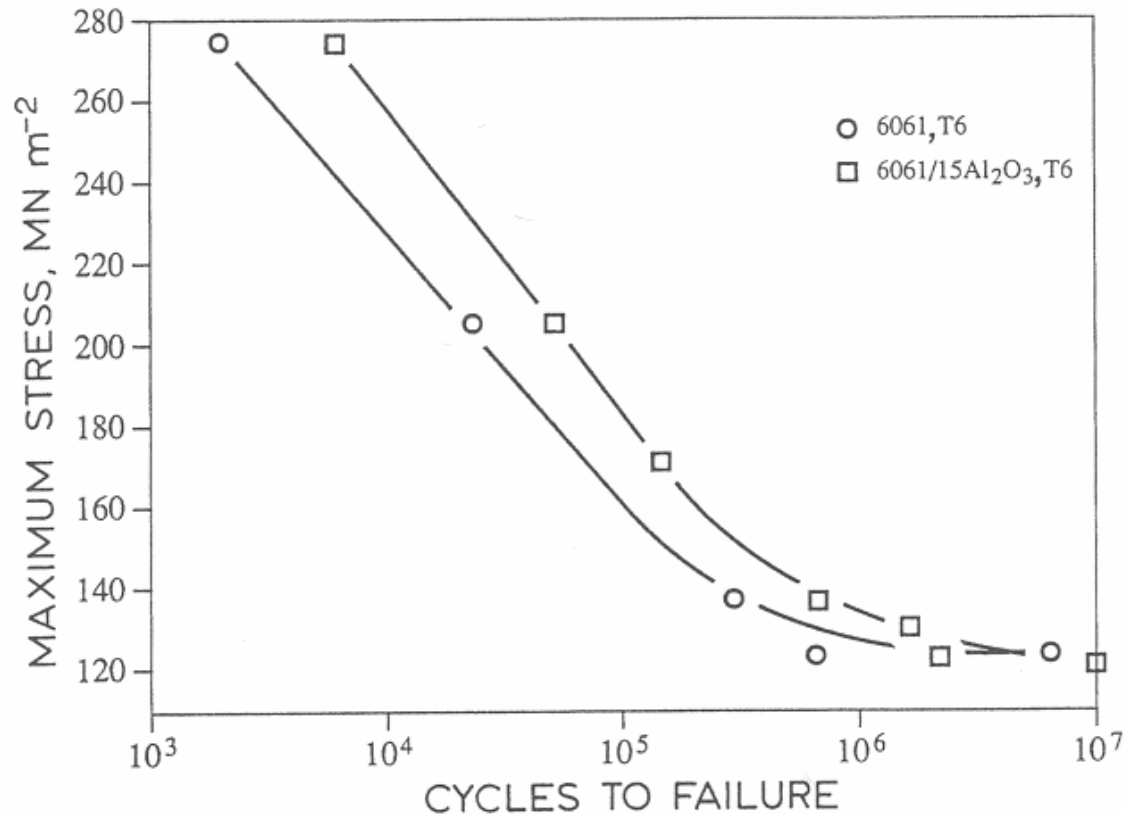
Propiedades mecánicas.

Tenacidad

- Distintos modelos relacionan la tenacidad con:
 - Espaciado entre partículas
 - Ligamento entre dos partículas rotas
 - Nucleación de cavidades en las intercaras
- ¿Influencia T ?
- No existen modelos fiables que consideren:
 - No homogeneidad
 - Distribución tamaño de partículas
 - Tensiones residuales
- Problemas experimentales. Los datos no son conformes con las normas por problemas con el crecimiento a fatiga de las grietas (hipótesis de deformación plana)

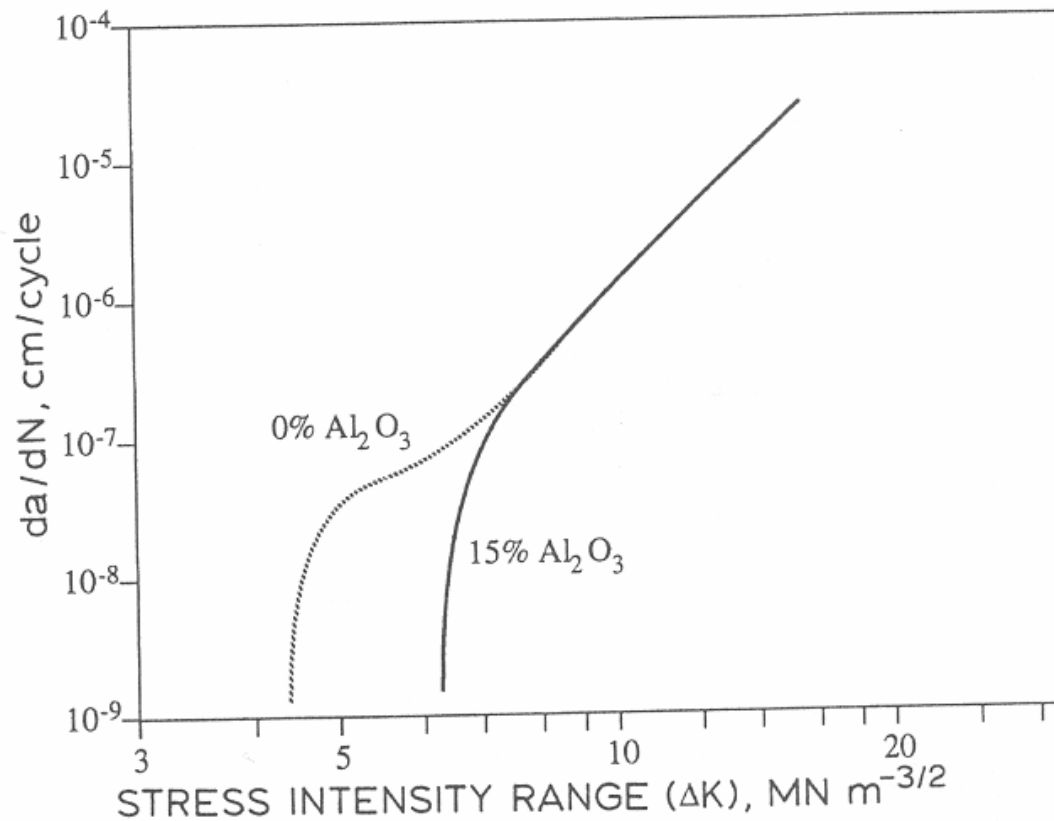
Propiedades mecánicas.

Fatiga



Propiedades mecánicas.

Fatiga



Propiedades mecánicas.

Fatiga

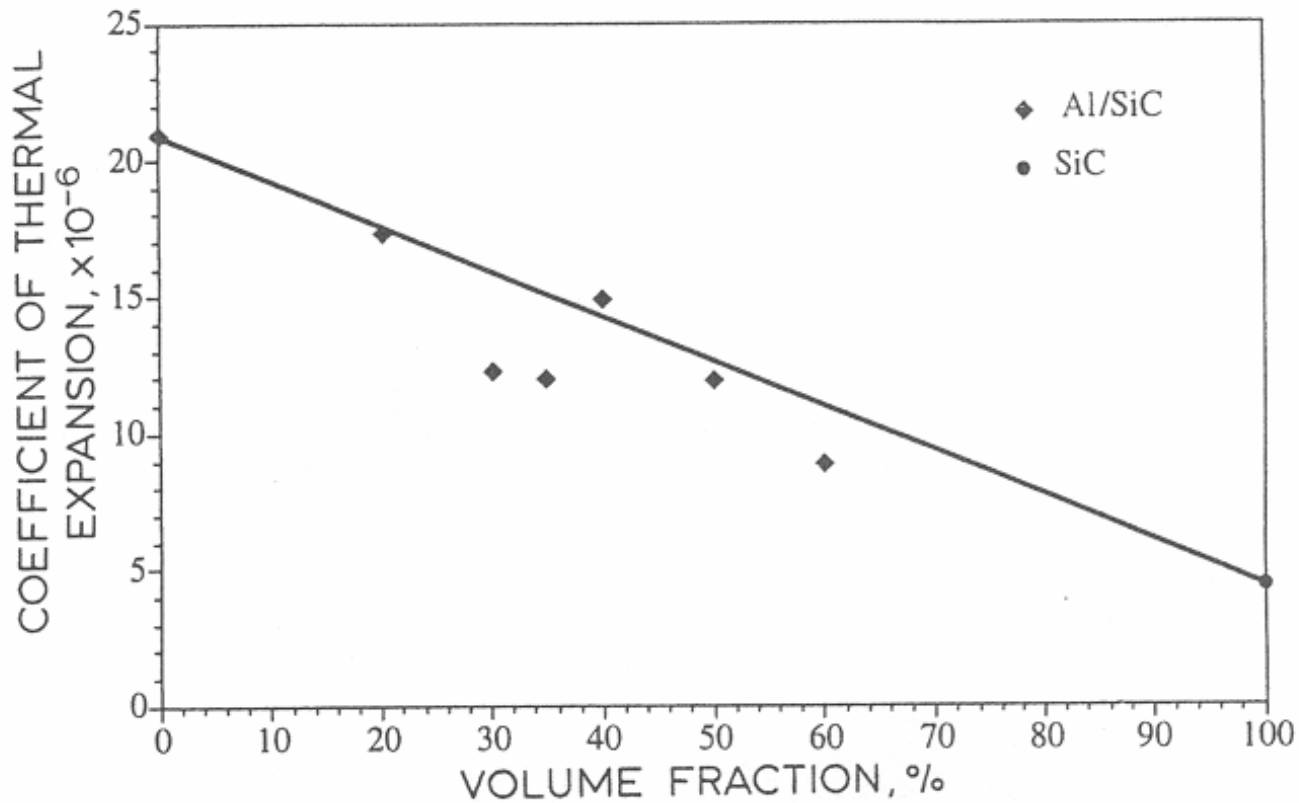
- Generalmente el comportamiento a fatiga es comparable o incluso mejor, excepto para *Ds* o *De* elevadas. En este caso el comportamiento se ve afectado por la disminución de la ductilidad

Propiedades mecánicas.

Fluencia lenta

- Una elevada fracción volumétrica de partículas finas mejora la resistencia al creep hasta 350°C. Por encima de esta temperatura las partículas no restringen la plasticidad de la matriz y el comportamiento del MMC es similar al de la matriz sin reforzar.

Comportamiento térmico



Aplicaciones

- Discos de freno. Al-10%Si/20% SiC
 - Buena resistencia al desgaste
 - Baja densidad (rotación)
 - Elevada conductividad térmica
- Ford, Toyota
- Rutas fundición