



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Mecánica

ME42A Metalurgia General

Fatiga de aleaciones de aluminio AA2026 por flexión de cuatro puntos

Javier Acosta Jiménez
Pablo Fernández Salas

Semestre Otoño 2006

Índice

1. Objetivos	1
2. Introducción	2
3. Campo Teórico	3
3.1. Modelo cristalográfico para el retardo de una grieta en el borde de grano	3
3.2. Crecimiento de grietas en aluminios de alta resistencia	4
4. Experimento de Flexión	5
4.1. Alcances	5
4.2. Detalles Experimentales	6
4.3. Resultados	7
5. Conclusiones	9
6. Bibliografía	10

Capítulo 1

Objetivos

- Estudiar la resistencia a la fatiga en aleaciones de aluminio AA 2026
- Estudiar la textura global de la aleación AA 2026

Capítulo 2

Introducción

La serie 2000 de aleaciones de aluminio, especialmente su versión alta en Mg (por ejemplo las aleaciones AA2024 y AA2014), son extensamente usadas en aplicaciones aeroespaciales por su alta resistencia (debido principalmente a las fases de precipitación Al_2Cu o Al_2CuMg , dependiendo de la razón $\frac{Cu}{Mg}$ y el contenido de Si) al daño y baja densidad. Por los requerimientos de las aplicaciones aeroespaciales, las propiedades de fatiga de estas aleaciones son críticas al diseño de ingeniería. Las propiedades de fatiga, como la iniciación de grieta, el desarrollo de pequeñas grietas y final de ellas, la anisotropía de la propagación de las grietas de fatiga, etc. de las aleaciones de aluminio AA2024 han sido extensamente investigadas. Para encontrar una aleación de Al que responda a la exigencia de mayor dureza y resistencia, para así mejorar la seguridad de aeronaves, una nueva aleación de Al-Mg-Cu, AA2026 fue desarrollada por Alcoa en el 2001, la cual esta basada en la aleación AA2024. Comparado con su precesor, el AA2026 es mas puro, i.e. contiene menos impureza (Fe y Si), y contiene una pequeña adición de Zr para inhibir la re cristalización. Muestra una mayor resistencia a la tensión, y un alto rendimiento a la fatiga y resistencia a la misma.

Este trabajo forma parte del desarrollo de un modelo cuantitativo para evaluar la resistencia a la fatiga total del crecimiento de grietas en un material metalico, basados en la medicion de la textura global.

Capítulo 3

Campo Teórico

3.1. Modelo cristalográfico para el retardo de una grieta en el borde de grano

La siguiente figura muestra un modelo que utiliza dos parámetros cristalográficos de bordes de grano para definir el retardo en el crecimiento de grietas a travez del camino que esta sigue.

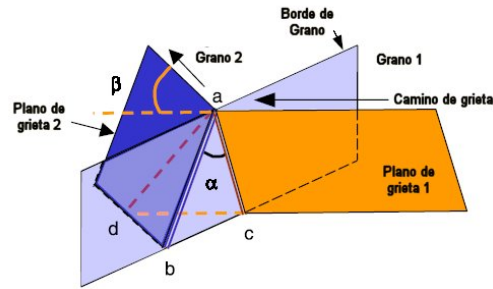


Figura 3.1: Planos cristalográficos

En condiciones en las que las grietas prefieren continuar por planos limpios sin granos que la obstruyan, uno de los dos parámetros considerados es el ángulo de "twist", α , que es el ángulo entre las dos líneas que se intersectan (ab y ac) de los dos planos que definen al plano de borde de grano. α representa la mayor resistencia a la propagacion de grietas desde un grano a otro, en el area (abc) definida por α en el plano del borde de grano sera fracturado por el crecimiento de la grieta. El otro parámetro es el ángulo de "tilt", β , que es el ángulo entre la línea de interseccion de los dos planos de la superficie de la grieta. Los parametros α y β pueden ser definidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \arccos([E]X[N_1]\Delta[E]X[N_2])$$

$$\beta = \arccos([Z]X[N_1]\Delta[Z]X[N_2])$$

Donde $[E]$, $[Z]$, $[N_1]$ y $[N_2]$ son los vectores unitarios del borde de grano y del plano normal, la superficie normal y la normal de los dos planos en los alrededores del borde de grano respectivamente en el sistema coordinado. Es necesario conocer todos estos vectores si se requiere calcular α y β . Utilizando EBSD, pueden observarse las orientaciones ($[N_1]$ y $[N_2]$) de los dos planos de grietas a travez del borde de grano, pudiendo ser determinados por la medicion de las orientaciones de los dos granos y de las orientaciones de los dos caminos que toma el crecimiento de grieta en la superficie. $[Z]$ puede ser definido como uno de los tres ejes coordinados. Para una orientación de borde de grano aleatoria, $[E]$ es desconocido.

Para que una grieta corta pase por un borde de grano, tanto α como β deben ser minimos. La grieta es severamente retardada cuando ninguno de los planos posibles en el proximo grano forma pequeños α y β . La ramificacion de las grietas es causada por el encuentro con un borde de grano, donde el crecimiento forma alrededor del grano crecimientos de grietas pequeñas en direcciones que rodean al grano. Una pequeña grieta es generada en una primera instancia por la interaccion de la grieta con el plano primario del grano proximo, si ese plano tiene un gran α , la energia para generar la fractura en el area abc se incrementa a medida que la grieta avanza en el material, para eventualmente detener el crecimiento de grieta. Una nueva grieta puede ser generada en otro plano (usualmente en uno secundario) que posee un α pequeño, que posee un factor de Schmid mucho menor. Este modelo a sido usado satisfactoriamente para interpretar el crecimiento de pequeñas grietas por fatiga observadas en aleaciones de aluminio AA8090 y AA2026

3.2. Crecimiento de grietas en aluminios de alta resistencia

Este tipo de aleaciones (AA 2026) contienen pequeños niveles de Fe y Si y en pequeña proporcion Zr con el fin de evitar la recrystalizacion durante los procesos termomecanicos. La iniciación de la grieta por fatiga no es solo cristalografico, sin embargo el crecimiento de grieta si lo es.

Es posible ver como la grieta se desvia en cada uno de los bordes de grano que logra superar. Las deflecciones poseen principalmente pequeños componentes de torsión, los escalones de crecimiento de grano son mucho mas pequeños en aquellos planos en los que no se encuentran granos. Algunos de las desviaciones pueden ser causadas por diferencias de densidad generadas por precipitaciones de componentes de la aleación.

Capítulo 4

Experimento de Flexión

4.1. Alcances

Basados en el efecto de la concentración de los bordes de grano en el tamaño de grieta en la zona plastica, un modelo de dislocación bidimensional a sido diseñado para describir el efecto del bloqueo del borde de grano sobre el crecimiento de la grieta a traves del material, haciendo posible una estimacion del retardo en la velocidad del crecimiento de la grieta por efecto del encuentro con un borde de grano, lamentablemente este modelo no es capaz de distinguir la diferencia entre diferentes tipos de bordes de grano. Hay que considerar dentro de un modelo predictivo las variaciones en el modulo de elasticidad de los diferentes granos a los que se enfrenta la grieta en su avance en un esfuerzo por lograr una mejor simulación del fenómeno. Con el uso del sistema de un microscopio electronico de barrido (electrón back scatter diffraction .^{EBSD}), es posible observar el efecto de la geometría cristalografica de los bordes de grano. Un modelo cristalografico tridimensional ha sido subsecuentemente propuesto para predecir la deflexion de grietas (incluidos grietas planares, por deflexion y "tilt") y el camino recorrido a travez de los bordes de grano. Los componentes de deflexion y de "tilt" de la grieta en un borde de grano son los factores clave que controlan el crecimiento de las grietas. El crecimiento observado en aleaciones de Aluminio-Litio (específicamente el 2026) son consistentes con este modelo de prediccion cristalografica. Este modelo predictivo no solo es aplicable a crecimiento de grietas pequeñas, sino tambien a grietas grandes, en donde el crecimiento esta determinado esencialmente por condiciones cristalograficas. En el paper seleccionado, son registrados los efectos en el crecimiento de grieta cortas por efecto de micro texturas.

El método de los cuatro puntos de flexión fue usado para medir las propiedades de fatiga de materiales, este método ofrece una serie de ventajas en el estudio del desarrollo e indicación de grietas. No obstante, no ha sido un método estándar para el test de geometría, el experimento incluye una muestra y una geometría de carga en la plataforma de test. La muestra de la geometría de carga se ha encontrado que tiene un importante efecto en los resultados del test en mención. La geometría de carga

comúnmente usada es la que tiene la proporción largo-soporte/largo-carga dos o tres, la cual usualmente no permite elevar la tensión en la superficie de la muestra de trabajo la tensión en los cuatro puntos de flexión. La distribución de tensiones no uniforme da un resultado inconsistente en el test de los cuatro puntos de flexión. Con esa razón L/t una muestra falla en cualquier parte superior en las barras, cuando la muestra es delgada o derecho en el medio, pero el resto es grueso. El test óptimo de geometría para la fatiga en cuatro puntos de flexión ha sido establecido por un trabajo numérico y experimental. Este test geométrico, combinado con un auto alineamiento en la flexión de cuatro puntos para la plataforma, la cual usa un hemisferio en la junta entre el plato y la barra de carga, produce resultados consistentes y reproducibles. En este trabajo usamos el ejemplar óptimo en, la geometría y el aparato de cuatro puntos de flexión, para obtener datos de fatiga para aleaciones de AA 2026.

4.2. Detalles Experimentales

En este estudio se usaron barras de extrusión de la aleación de aluminio 2026. Comparada con el aluminio AA2024, la aleación AA 2026 tiene bajos niveles de Fe, Si y Cu, y contiene una pequeña adición de Zr. La barra de extrusión tiene dos secciones diferentes: cuadrada (120 x 120 mm) y rectangular (30 x 470 mm), fue suministrada en una condición a-T3511, la cual incluye un tratamiento de calor, apagado de agua, un estiramiento de 1 a 3 por ciento, y finalmente, una madurez. El límite de resistencia a la tracción de la sección cuadrada y rectangular fue de 427 y 372 MPa respectivamente.

El test de altos ciclos de fatiga fue conducido por una dirección de extrusión en los planos largo-longitudinal y corto-longitudinal en las barras de extrusión usando un auto alineamiento en el método de cuatro puntos de flexión. La prueba de geometría produce una distribución uniforme en la superficie que estaba siendo tensionada bajo en cuatro puntos de flexión. La prueba de fatiga fue orientada a una razón de tensión de 0.1, con una forma de onda sinusoidal y en una cámara de temperatura. Debido a la sensibilidad medioambiental de las propiedades de fatiga de la aleación de aluminio, la humedad en el laboratorio de prueba fue mantenida en un rango de 40 a 50 %.

La superficie que fue cargada en tensión durante la prueba de cuatro puntos de flexión fue cuidadosamente desgastada usando papeles impermeables de SiC y limpiando mecánicamente usando líquido antes de la prueba de fatiga. La prueba estuvo interrumpida periódicamente para la observación y medida de las grietas mediante un microscopio óptico de 200 aumentos. En el escaneo fueron utilizados un microscopio y un espectroscopio para investigar la superficie de fractura de fatiga y la composición química de las partículas de la aleación.

4.3. Resultados

La aleación no se recrystalizo, debido principalmente a la adición de Zr, como partículas dispersas de $ZrAl_3$, que efectivamente pudieron detener que la recrystalización ocurriera. La barra rectangular poseyó una estructura de grano, mientras la barra cuadrada tenía una estructura de grano fibrosa áspera. Los GBs en el par de barras de extrusión fueron rectos y altamente elongados en la dirección de extrusión. El tamaño del diseño de grano fue de $20\text{ }\mu\text{m}$. Y el diámetro de la fibra de grano fue alrededor de $100\text{ }\mu\text{m}$. El aspecto en la proporción entre la barra rectangular y cuadrada fue de aproximadamente 100 y 20 respectivamente.

En este trabajo fue dificultoso grabar esta aleación AA 2026, por la química comúnmente usada para las aleaciones de Cu. Por lo tanto, los GBs no fueron discernidos en lo relativo a la alta magnificación, usando microscopio óptico. Esto quizás fue debido a la composición de la aleación, el potencial electrolítico in el sustrato y en los GBs fueron muy cerrados. Similar a otras aleaciones, esta llegó a ser altamente resistente a la corrosión intergranular. Como resultado, la estructura de grano en la dirección perpendicular a la dirección de extrusión de la barra cuadrada fue casi indiscernible, aunque pudo aun ser caracterizado por observación de la estructura de grano en las otras dos secciones paralelas a la dirección de extrusión.

La no re cristalización de la estructura de grano en esta muestra de extrusión fue consistente con la textura medida. La textura de la barra de extrusión rectangular fue encontrada ondulada consistiendo principalmente de latón, cobre y componentes de S, mientras la barra cuadrada mostró una textura fibrosa, típica de una extrusión de un metal fcc. La textura ondulada se le llama fibra-beta comúnmente.

La profunda diferencia en la estructura de grano entre la barra cuadrada y rectangular implicó también que pudo ser usada en el control de la estructura de grano de esta aleación. En contraste con la densamente distribuida y relativamente fina constitución de las partículas de la aleación 2024, las partículas observadas en la aleación 2026 fueron ásperas, elongada, y a menudo agrupado dentro de bandas en la dirección de extrusión. Esto constituye partículas que fueron formadas durante la solidificación y elongación y alineamiento junto con la dirección de extrusión durante la extrusión caliente. La principal razón en la diferencia de estructuras de partículas entre las dos aleaciones fue que la deformación plástica generada por la extrusión fue simplemente bastante pequeña al quebrar las partículas constituyentes en pequeños fragmentos enrollados en la aleación 2024 y dispersos uniformemente en la aleación 2026.

En general, dos tipos de partículas intermetálicas pudieron ser observadas en esta aleación 2026 en un microscopio óptico. Un tipo fue grande 10 a 40 μm), oscuro, e irregular en forma; el otro tipo fue relativamente pequeño mas esférico y gris. Un análisis EDS de estas partículas reveló que lo grande y la forma angular, oscuras partículas contienen Al, Cu, Fe y Mn. comúnmente son la fase $\text{Al}_{20}\text{Cu}_6$. Una fase similar, Al_7Cu_2 , ha sido previamente reportada por otros estudios en 2024 como también en aleación de Al 7xxx. Creemos que estas dos partículas son posiblemente la misma fase, tienen casi la misma composición química, se discutirá la fragilidad de estas partículas y la preferencia para que ocurra iniciación de grieta en esta aleación.

El análisis EDS también reveló que hay otras dos partículas, una fue la fase Al_2CuMg con tamaño de varios micrones y la otra fue la fase Al_2Cu con varios micrones también de tamaño. Pareció que estas partículas no fueron relacionadas con al iniciación de grietas en la aleación 2026, como en la 2024. Algunas partículas con contenido Si también fueron observadas en la aleación 2026, posiblemente debido al efecto de que ese contenido de Si fue también bajo.

Para la barra rectangular el esfuerzo de fatiga fue de 334 MPa y de 360 Mpa para la barra cuadrada de extrusión. También fue encontrado que el esfuerzo de fatiga para los dos planos testeados (L-s y L-T) de la barra rectangular fue casi idéntico. Típicamente las aleaciones de aluminio presentan esfuerzos de tracción del 50 % del esfuerzo máximo a la tracción. Para la aleación de AA 2024 el esfuerzo de fatiga es típicamente 140 MPa, que corresponde al 43 a 45 % del esfuerzo máximo a la tracción. Posiblemente, algunas partículas y granos extremadamente largos, en la dirección de extrusión en esta aleación AA 2026, fueron responsable en la mejora del esfuerzo de fatiga.

Capítulo 5

Conclusiones

Se encontró que en la aleación 2026, en los dos tipos de barras, la iniciación de grietas se produjo en las grandes partículas, esto ha sido previamente reportado en las partículas de contenido Fe. También se encontró que en algunas partículas de forma angular oscuras estuvo fracturada antes de la prueba de fractura. Las partículas probablemente se fracturaron debido a su pobre ductilidad y elevadas temperaturas.

Los modelos cristalográficos mostrados en una primera parte ha provado ser el mecanismo para generar retardos en la propagación de grietas por bordes de grano en un sistema de aleaciones que se disponen de forma planar. Este mecanismo de deflexión es controlado por los componentes de torsión y "tilt" del plano de agrietamiento, los cuales están determinados a su vez por la geometría cristalográfica y la orientación de los bordes.

La textura es el primer parámetro que es necesario manejar para controlar el inicio del crecimiento de grietas y su posterior crecimiento, es por esto que en función de mejorar las propiedades de fatiga del elemento hay que guardar especial reparo. Es posible resumir diciendo que este sistema entrega una base de análisis para predecir de forma eficiente el desarrollo del crecimiento de una grieta pequeña generada por fatigas del material y evaluar las propiedades de fatiga tomando en cuenta la textura y la estructura de grano de la aleación.

Capítulo 6

Bibliografía

- [1] T. Zhaia, J.X. Lia, M.D. Garrattb, G.H. Brayb: *Four-Point-Bend of Fatigue AA 2026 Aluminum Alloys*, Materials Transaction, USA (2005).
- [2] T. Zhaia, X.P. Jianga, J.X. Lia, M.D. Garrattb, G.H. Brayb: *The grain boundary geometry for optimum resistance to growth of short fatigue cracks in high strength Al-alloys*, International Journal of Fatigue, USA (2005).