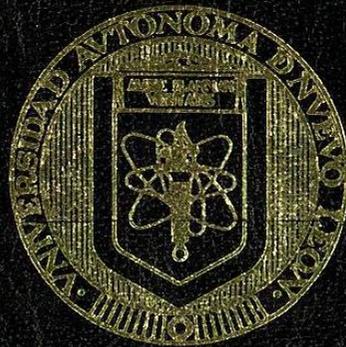


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**TRATAMIENTO TERMICO DE UNA ALEACION
DE ALUMINIO 6063**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN
INGENIERIA DE MATERIALES**

**PRESENTA
JOSE LUIS CAVAZOS GARCIA**

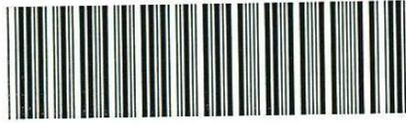
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 1998

J.L.C.G.

TRATAMIENTO TERMICO DE UNA ALEACION
DE ALUMINIO 6063

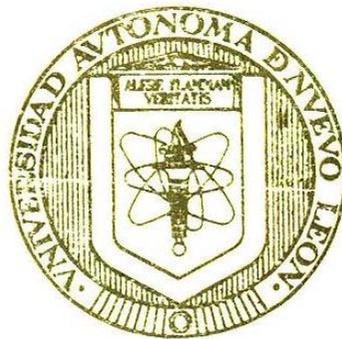
TD
Z5853
.M2
FIME
1998
C3



1020146066

m

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TRATAMIENTO TERMICO DE UNA ALEACION
DE ALUMINIO 6063

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN
INGENIERIA DE MATERIALES

PRESENTA
JOSE LUIS CAVAZOS GARCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 1998

0150-98660

TD
Z 5853
.M2
FINE
1998
C3.



FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN
INGENIERIA DE MATERIALES

PRESENTA
JOSE LUIS CAVAZOS GARCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARCAS L. JUNO DE 1998

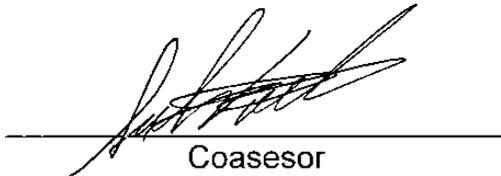
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“Tratamiento Térmico de una Aleación de Aluminio 6063”** realizada por el M.C. José Luis Cavazos García sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El comité de Tesis



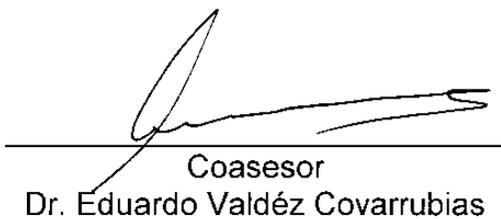
Asesor
Dr. Rafael Colás Ortiz



Coasesor
Dr. Salvador Valtierra Gallardo



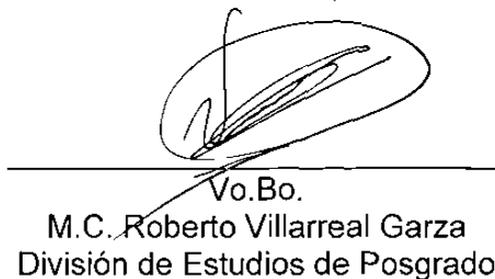
Coasesor
Dr. Juan Francisco Mojica Briseño



Coasesor
Dr. Eduardo Valdéz Covarrubias



Coasesor
Dr. Eulogio Velasco Santes



Vo.Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Posgrado

DEDICATORIA

a Dios

por darme la salud para concluir este proyecto

a Consuelo, José Luis y Rocío

por ser la fuerza motora de mi vida

a Leonor

por darme la vida

AGRADECIMIENTOS

Al **Conacyt** por su apoyo económico.

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León** por dejarme realizar este proyecto.

A mi querida **Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**.

A **José Antonio Gonzalez T. y Castulo E. Vela V.** por todo su apoyo y confianza.

A todos los **maestros del DIMAT** porque de alguna u otra forma me enseñaron a ver las cosas en forma diferente.

Al **Dr. Rafael Colás O.** por su invaluable ayuda para el desarrollo de este proyecto.

A los **Coasesores** de este trabajo por sus valiosos consejos.

A todos los **maestros de esta Facultad** por ayudarme con sus estímulos que ya sea en broma o en serio me sirvieron para concluir este proyecto.

A todos mis **compañeros del DIMAT** por su amistad.

Al **Dr Armando Salinas y M.C. Dagoberto Vazquez** por su ayuda.

A **ALUDER S.A. de C.V.** por el material aportado.

A **Eyleen, Francisco, Margarita, Andres, Juanelo, Omar, Charly y Lupita** por la talacha realizada en este trabajo

A todos mis **familiares y amigos** por su apoyo.

A mi **Rají**

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN 1

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN 3

CAPÍTULO 2 EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES 7

2.1.- Introducción 7

2.2.- Propiedades de el aluminio 8

2.3.- Areas de aplicación 9

2.4.- Clasificación de las aleaciones del aluminio 10

2.4.1.- Clasificación de aleaciones trabajadas de aluminio 11

2.4.2.- Clasificación de las aleaciones vaciadas de aluminio 11

2.5.- Sistemas de designación para tratamientos al aluminio y sus aleaciones 12

CAPÍTULO 3 TRATAMIENTO TÉRMICO EN ALEACIONES DE ALUMINIO 14

3.1.- Introducción 14

3.2.- Bases para el tratamiento térmico 15

3.3.- Elementos de aleación que responden al tratamiento térmico 16

3.4.- Pasos a seguir para llevar a cabo un tratamiento térmico 17

3.4.1.- Tratamientos de Solubilización 18

3.4.2.- Enfriamiento rápido 19

3.4.3.- Tratamiento de envejecido o endurecimiento por precipitación	21
3.5.- Mecanismo que sigue el tratamiento térmico envejecido	22
3.5.1.- Mecanismo de difusión	22
3.5.2.- Teoría del Mecanismo de envejecido	25
3.5.3.- Mecanismo de solubilización	25
3.5.3a.- Mecanismo de solubilidad en aleaciones de la serie 6000	27
3.5.4.- Mecanismo de la rapidez de nucleación durante la precipitación.	28
3.5.5.- Secuencia de precipitación	30
3.5.5a.- Zonas Guinier Preston	31
3.5.5b.- Efecto de trazas de elementos	33
3.5.6.- Secuencia de precipitación en aleaciones de aluminio de la serie 6XXX	33
3.5.7.- Efecto del manganeso sobre la precipitación en aleaciones de aluminio de la serie 6XXX	35
3.6.- Mecanismo de endurecimiento durante el envejecido	35
3.6.1.- Teoría del mecanismo del endurecimiento	36
3.6.1a.- Esfuerzo de corte de precipitados	37
3.6.1b.- Esfuerzo de la flexión de las dislocaciones	38
3.6.1c.-Esfuerzo de la matriz y la forma de los precipitados	39
3.6.1d.- Otros medios de endurecimiento	40
3.7.- Cinética de Precipitación	41
3.7.1.- Descripción analítica de las curvas de precipitación	41
3.7.2.- Cinética de precipitación isotérmica	43
3.7.2a.- Predicción de la resistencia mecánica	44
3.7.2b.- Efecto del proceso isotérmico	44
3.7.3.- Cinética de precipitación en enfriamiento continuo	48
3.7.3a.- El factor de enfriamiento rápido	49
3.7.3b.- Utilización del factor de enfriamiento para obtener el esfuerzo en una aleación de aluminio	50

3.7.3c.- Utilización del factor de enfriamiento para obtener el tipo de corrosión, en una aleación de aluminio	52
3.8.- Aleaciones Al - Mg – Si	52
3.8.1.- Propiedades de una aleación 6063 (0.7Mg-0.4Si)	54
CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	56
4.1.- Introducción	56
4.2.- Caracterización de la aleación	56
4.2.1.- Composición química	56
4.2.2.- Microestructura	57
4.3.- Preparación inicial de la muestra	57
4.4.- Tratamiento térmico	57
4.4.1.- Tratamiento de solubilización	58
4.4.2.- Tratamiento de enfriamiento rápido	58
4.4.3.- Preparación de las muestras para el tratamiento de envejecido	58
4.4.4.- Tratamiento de envejecido	59
4.4.5.- Microdureza	59
4.4.6.- Programa computacional para obtener resultados	59
4.4.7.- Difracción de rayos X y microscopía electrónica de transmisión	60
4.5.- Ensayos de compresión	60
4.5.1.- Preparación de las muestras	60
4.5.2.- Solubilización y enfriamiento rápido	61
4.5.3.- Dureza máxima y sobre-envejecido	61
4.5.4.- Velocidades de aplicación de carga y tipos de superficies de apoyo	61
4.5.5.- Condiciones de ensayos	62
4.5.6.- Programa computacional para análisis de ensayos	62

CAPÍTULO 5 RESULTADOS	63
5.1.- Calentamiento y enfriamiento	63
5.2.- Microdureza	64
5.3.- Curvas de envejecido artificial	64
5.4.- Dureza máxima	65
5.5.- Análisis de curvas de enfriamiento	65
5.6.- Difracción de rayos X	66
5.7.- Microscopía electrónica de transmisión	66
5.8.- Ensayos de compresión	67
CAPÍTULO 6 DISCUSIÓN	69
6.1.- Introducción	69
6.2.- Tratamiento de solubilización	69
6.2.1.- Temperatura de solvus	70
6.3.- Enfriamiento rápido	70
6.4.- Tratamiento de envejecido	71
6.5.- Análisis de curvas de envejecido	71
6.5.1.- Influencia de la temperatura	71
6.5.2.- Influencia de l enfriamiento rápido	72
6.6.- Identificación de precipitados	74
6.6.1.- Difracción de rayos X	74
6.6.2.- Microscopía electrónica de transmisión	75
6.7.- Predicción de la dureza máxima en función del factor del enfriamiento rápido	77
6.7.1.- Introducción	77
6.7.2.- Enfriamiento continuo	77
6.7.3.- Factor de enfriamiento rápido	78
6.8.- Método para predicción de dureza máxima	79
6.8.1.- Análisis de las curvas de enfriamiento rápido	79

6.8.2.- Diagrama de precipitación durante enfriamiento continuo	80
6.8.3.- Dureza máxima en función del tiempo de enfriamiento rápido	80
6.9.- Ensayo de compresión	82
6.9.1.- Diferentes estados de tratamiento térmico	82
6.9.2.- Dirección del extruido	83
6.9.3.- Sensibilidad a la velocidad de deformación	83
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
7.1.- Conclusiones	85
7.2.- Recomendaciones	86
REFERENCIAS	88
FIGURAS	95
TABLAS	130
APÉNDICE A	141
APÉNDICE B	154
APÉNDICE C	166
LISTA DE FIGURAS	186
LISTA DE TABLAS	190

RESUMEN

Se realizaron una serie de tratamientos térmicos en una aleación extruida de aluminio 6063. El material fue solubilizado a 520 °C, enfriado a diferentes velocidades y envejecido a 130, 180 y 230 °C. Las diferentes muestras tratadas fueron objeto de ensayos de microdureza, difracción de rayos X y microscopía electrónica de transmisión. Se graficaron las curvas de la dureza en función del tiempo y se encontró la dureza máxima para cada condición de envejecido, observándose que, a mayor temperatura de envejecido se requiere un menor tiempo para alcanzar la dureza máxima, pero ésta resulta ser menor.

Se emplearon las curvas de calentamiento para determinar la temperatura de solvus y las de enfriamiento para obtener las de inicio y final de precipitación. Se graficaron esas condiciones en función del tiempo y se obtuvo un diagrama de precipitación durante enfriamiento continuo. Se determinó la variación de dureza en función de la velocidad de enfriamiento y se comparó con el valor máximo alcanzado encontrado en las regiones enfriadas a velocidades mayores a 10 °C/seg. Este decremento en dureza se asoció con el tiempo disponible para precipitación y se desarrolló un modelo que relaciona la reducción en dureza con el intervalo de precipitación durante el enfriamiento.

Se obtuvieron muestras cilíndricas en dirección longitudinal y transversal a la dirección de extrusión del material, las muestras fueron sometidas a diferentes condiciones de tratamiento térmico, completamente sobresaturadas en estado sólido, máxima dureza y sobre-envejecido. Se hicieron ensayos de compresión a diferentes velocidades, utilizando teflón como lubricante entre los platos y la muestra. Se encontró que para las condiciones de máxima dureza, sobre-envejecido y extruido el comportamiento es el mismo aunque con diferente magnitud de esfuerzo de fluencia, en cambio, para la muestra

sobresaturada el comportamiento es diferente a las demás. Esta diferencia en comportamiento está posiblemente asociada con la tendencia a localizar el flujo plástico. Se encontró que el esfuerzo de fluencia es mayor en la condición transversal que la longitudinal, lo que se atribuye a la anisotropía causada por la textura.