UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDADURA DE ACEROS COMPLEJOS TERMOGALVANIZADOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:

DIONE ANABELI FERNANDEZ CARBAJAL

CIUDAD UNIVERSITARIA FEBRERO 2005

2005

TM
Z5853
.M2
FIME
2005
F36

SOLDADURA DE ACEROS COMPLEJOS
TERMOGALVANIZADOS

D. A. F. C.

1020150556

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDADURA DE ACEROS COMPLEJOS TERMOGALVANIZADOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:

DIONE ANABELI FERNANDEZ CARBAJAL

CIUDAD UNIVERSITARIA FEBRERO 2005

SH

CAPILLA ALFONSINA
FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDADURA DE ACEROS COMPLEJOS TERMOGALVANIZADOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

DIONE ANABELI FERNANDEZ CARBAJAL

CIUDAD UNIVERSITARIA **FEBRERO 2005**

SH

995751

TM
Z5853
.M2
FIME
2005
F36

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDADURA DE ACEROS COMPLEJOS TERMOGALVANIZADOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

DIONE ANABELI FERNANDEZ CARBAJAL

CIUDAD UNIVERSITARIA **FEBRERO 2005**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Soldadura de Aceros Complejos Termogalvanizados", realizada por la Ing. Dione Anabelí Fernández Carbajal, matrícula 0953554, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor
Dra. Martha Patricia Guerrero Mata

Coasesor
Dr. Rafael Colás Ortiz

Coasesor
Dr. Eduardo Valdés Covarrubias

Vo.Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Postgrado.

San Nicolás de los Garza; Nuevo León, Febrero 2005

DEDICATORIAS

A Dios,

Por todas las bendiciones que me ha dado, por haberme permitido vivir esta experiencia y por la fortaleza que me ha brindado a lo largo de mi vida.

Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.

DEDICATORIAS

A mis padres,

Por todo el amor, comprensión, enseñanzas y apoyo incondicional que me han dado durante mi vida. Le doy gracias a Dios por darme unos padres como ustedes, los amo mucho.

A mis hermanos Diane y Eduardo.

A mi tía Diane,

Gracias tía, por tu amor, apoyo y ayuda que me has dado desde que nací, por todas las oraciones que has hecho por mí y que me han ayudado y me han sacado de apuros, Dios te bendiga.

A mi tío Ricardo,

Tío, te agradezco toda la ayuda que me has brindado en estos años, la paciencia que has tenido conmigo, gracias por tu cariño y por tus enseñanzas que están presentes en mi mente y corazón.

A mi abuelita Chelita,

Por todo el amor que me dio siempre, aunque ya no estés físicamente aquí, sigues estando presente en mi corazón todos los días.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por permitirme ser miembro de la comunidad estudiantil, así como también quiero dar gracias al Departamento de Posgrado de FIME por haberme considerado para ingresar al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales y darme la oportunidad de superarme profesionalmente.

Agradezco el apoyo económico brindado por CONACYT para la realización de mis estudios de maestría, así como también al programa PAICYT de la U.A.N.L.

Al Ing. René Garza de la empresa Galvak, S.A. de C.V. por haber brindado el material y el permiso otorgado para la utilización del equipo de análisis en las instalaciones de la empresa, lo cual hizo posible la realización de este proyecto.

Al personal del Departamento de Investigación y Desarrollo de Nuevos Proyectos en la empresa Galvak, al M.C. Antonio Maní Medrano, Ing. Antonio Sánchez, Ing. Nelly Cárdenas, Ing. Abel González, Ing. Carmen Guerrero y al Ing. Eduardo Martínez Torres, por haberme ayudado a realizar las pruebas analíticas de mi material. Gracias también al personal del laboratorio de procesos, al Ing. Alfredo Rocha, Ramón, Mauricio, Luis Mario, Luis y Carlos, por el tiempo y ayuda que me brindaron.

A mi asesora, la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata, gracias Doctora por haberme considerado para colaborar en este proyecto, por toda la ayuda y el apoyo que siempre me dio, por sus enseñanzas científicas, por la paciencia que me tuvo, por los congresos a los que me permitió asistir, por las experiencias vividas en estos dos años, gracias por ser una superasesora.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por ser tan accesible siempre, por toda la ayuda que me ha brindado, por todos sus comentarios y enseñanzas, por haber sido coasesor de este proyecto, por la confianza que ha depositado en mi, por todos los guateques, reuniones etílicas en el edificio 11, por la cinética con s y los asuntos de medición.

Al Dr. Eduardo Valdés Covarrubias, por haber aceptado a participar en la revisión de esta tesis.

A todos los profesores del Programa Doctoral, agradecimientos especiales al Dr. Pérez y sus enseñanzas culturales, la Dra. Doris, Dra. Ana María, Dr. Alan, Dr. Tushar, Dr. Mercado, Dr. Guerrero, Dr. Moisés, Dr. Ubaldo y Dr. Virgilio.

Quiero agradecer grandemente a quienes me ayudaron a realizar las pruebas de soldadura, a mis hermanitos: Chava, Luis Moya, Mayra y Lili.

A mi hermana Diane la arquiterca por haberme ayudado en los dibujos de la tesis.

A mis amigas de siempre, Angélica, Gaby y Magda, por la amistad que tenemos y por su apoyo infinito, chicas las quiero mucho, no cambien nunca, espero que nuestra amistad sea eterna y sigamos compartiendo mas experiencias como las que hemos tenido.

A mis amigas Diana, Gemma, Eréndira, Lili y Tere, por su apoyo y amistad que hemos construido y compartido durante estos dos años y, que espero perdure por mucho tiempo mas.

A mis compañeros de generación Jaimito, Mayra y Rorro.

Agradezco a mis amigos Alvaro, Chava, Efrén S., Lalo y Luis, por su amistad, por permitirme conocerlos y convivir con ustedes, y por todas las aventuritas que compartimos, gracias chicos.

A mis compañeros del programa, Angélica, Yuri, Armando, Jorge, Juanito, Mike, Orlando, Oscar, Urueta, Ismael, Vladimir, Yadira, Claudia López, Maribel, Claudia Amaro, Matilde, Angelina, Moni, Mara, Nancy, Carlitos, Casta, Eva, Fer, Lionel, Adela, Paloma, Efrén C., Marco, Niño, Nieto, Lalo D., Luis Gerardo, Julián, Manuel y Paco.

Agradezco la atención del Sr. Erasmo Espinoza (El Diablo) del laboratorio metalúrgico de Hylsa, asimismo al Ing. Sergio Caballero por haberme dejado utilizar el equipo de laboratorio.

A Rocío, Vero y Felipe, Lulú, Mariana, Maricela, Don Rodolfo, la Sra. Maricela, al M.C. Joel González M , M.C. Benito Garza, Gil, Alicia, Abundio, Félix y el Sr. Gastón.

A mi amigo César (Ponka), Víctor (el manito) y al Erin, a Jacobo, Jan y Ricard (los extranjeros), a Marquiño y el jeep y las maletas y a mi estimado amigo el ratón y las manzanas que se comió (¿no quieres más?).

INDICE

CAPITULO I

1.1 DESIGNACIÓN GENERAL DE LOS ACEROS 1

1.2 ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE Y EN FRIO 2

1.3 ACEROS DE ALTA RESISTENCIA 3

1.3.1 Clasificación 3

1.3.2 Aceros de alta resistencia y baja aleación 5

1.3.3 Aceros avanzados 6

1.3.3.1 Aceros doble fase 6

1.3.3.2 Aceros complejos 7

1.3.3.3 Aceros TRIP 7

1.3.3.4 Aceros martensíticos 8

1.4 ELEMENTOS DE ALEACIÓN 8

1.5 PROCESAMIENTO TERMOMECÁNICO 12

1.5.1 Refinamiento de grano ferrítico 13

1.5.2 Endurecimiento por precipitación 13

1.5.3 Etapas del procesamiento termomecánico 14

1.5.3.1 Deformación en el rango de temperatura de recristalización 15

1.5.3.2 Deformación en el rango de temperatura de no recristalización 15

1.5.3.3 Deformación en la región ferrita-austenita 15

1.5 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ 15

1.6.1 Estructuras y partes automotrices 16

CAPITULO II

2.1 INTRODUCCIÓN 18

2.2 GALVANIZADO CONTINUO POR INMERSIÓN EN CALIENTE 19

2.2.1 Proceso continuo 21

2.2.2 Sección de pre-limpieza 21

2.2.3 Sección de limpieza 21

2.2.4 Zona de calentamiento 22
2.2.5 Recubrimiento de la lámina 23
2.2.6 Control del recubrimiento 24
2.2.7 Tratamiento térmico post-inmersión 24
2.2.8 Zona de enfriamiento 24
2.2.9 Procesos posteriores 24
2.3 RECUBRIMIENTO 25
2.3.1 Equilibrio y cinética de fases 25
2.3.2 Formación de las fases Fe-Zn 28
2.3.3 Reacción cinética de las fases Fe-Zn 30
2.3.4 Reacciones interfaciales 31
2.3.5 Equilibrio del sistema Fe-Zn-Al 31
2.3.6 Elementos de aleación 32
2.3.7 Adiciones de Al (<1%) 33
2.3.8 Inhibición de las reacciones Fe-Zn 34
2.3.9 Formación de escorias en el baño de Zn 35
2.3.10 Adiciones del substrato 35
2.4 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS 36
2.4.1 Galvanizado (Al< 1%) 36
2.4.2 Galvanneal 37
2.4.2.1 Microestructura del galvanneal 39
2.4.2.2 Variables de proceso 41
2.4.3 Otros recubrimientos 41
2.5 PROPIEDADES DEL RECUBRIMIENTO 41
2.5.1 Resistencia a la corrosión 41
2.5.1.1 Métodos anticorrosivos 42
2.5.1.2 Tratamiento químico de pasivación 42
2.5.1.3 Aceites de pasivación 43
2.5.2 Formabilidad 43
2.5.3 Soldabilidad 44
2.5.4 Pintado 45

CAPITULO III

3.1 INTRODUCCIÓN 46

3.2 SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA 46

3.3 MORFOLOGÍA DEL PUNTO DE SOLDADURA 47

3.4 CICLO DE SOLDADURA 47

3.5 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO 48

3.5.1 Gradiente de temperatura 49

3.5.2 Electrodos 51

3.5.3 Superficies de contacto 51

3.5.4 Materiales de trabajo 51

3.5.5 Tiempo 52

3.5.6 Fuerza de soldadura 53

3.5.7 Efecto de desviación 53

3.5.8 Impulsos múltiples 54

3.6 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE SOLDADURA 54

3.7 CURVA DE SOLDABILIDAD 55

3.8 EQUIPO 56

3.9 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA SOLDADURA 56

3.9.1 Soldadura de aceros recubiertos 58

3.9.2 Electrodo 59

3.9.3 Deterioro del electrodo 60

3.9.4 Fuerza del electrodo 60

3.9.5 Tiempo de soldadura 61

3.9.6 Corriente de Soldadura 61

3.9.7 Tiempo de sostenimiento 62

3.9.8 Desviación de la corriente 62

3.9.9 Enfriamiento del electrodo 63

3.9.10 Espesor del recubrimiento/lámina 63

3.9.11 Contaminación superficial 63

3.9.12 Sensibilidad al tiempo de sostenimiento 63

3.10 FORMACIÓN DEL PUNTO DE SOLDADURA 65

3.11 PROPIEDADES MECÁNICAS 67
3.12 MODO DE FRACTURA 67
3.13 DEFECTOS EN LA SOLDADURA 68
3.14 EFECTOS DE ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LA SOLDADURA 69
3.15 ESTÁNDARES DE CALIDAD 70
3.16 FACTOR ECONÓMICO 71

CAPITULO IV

4.1 OBJETIVO 72
4.2 PARÁMETROS DE SOLDADURA 72
4.3 PRUEBA DE SOLDADURA 74
4.3.1 Obtención del material 74
4.3.2 Prueba de soldadura 74
4.3.3 Estabilización de corriente y electrodos 75
4.3.4 Soldadura de cupones 75
4.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL 76
4.4.1 Substrato 76
4.4.2 Recubrimiento 77
4.4.3 Puntos de soldadura 79
4.4.4 Electrodos 79
4.5 CRITERIOS DE EVALUACION EN LOS PUNTOS DE SOLDADURA 80
4.5.1 Botones de soldadura 80
4.5.2 Núcleos de soldadura 81

CAPITULO V

5.1 PROCESAMIENTO DE LA LAMINA 83
5.2 ANALISIS DEL SUBSTRATO 84
5.3 ASPECTO DEL GALVANIZADO 89
5.4 ANALISIS DE LOS PUNTOS DE SOLDADURA 93
5.4.1 Botones de soldadura 93
5.4.2 Secuencia del crecimiento de los botones de soldadura 95

5.4.3 Defectos en los botones de soldadura 99
5.4.4 Núcleos de soldadura 100
5.4.5 Secuencia de crecimiento de los núcleos de soldadura 111
5.4.6 Microestructura del núcleo de soldadura 115
5.4.7 Defectos en los núcleos de soldadura 116
5.4.8 Condiciones óptimas de parámetros de soldadura 126
5.5 ANALISIS DEL ELECTRODO 126

CAPITULO VI
6.1 CONCLUSIONES 133
6.2 RECOMENDACIONES 136

ANEXO I - Categorías de Acero Automotriz de la SAE 137

ANEXO II – Clases de Electrodos RWMA 138

ANEXO III – Equipo de Análisis 139

REFERENCIAS 142

LISTADO DE FIGURAS 149

LISTADO DE TABLAS 154

RESUMEN

Desde la escasez de combustible en 1970 y la introducción de regulaciones ambientales más severas, se le ha exigido a la comunidad automotriz el introducir iniciativas que conlleven hacia una eficiencia más alta del combustible de un vehículo [1].

Los automóviles juegan un papel importante en la vida diaria de las personas. Esto hace necesario tratar incesantemente de reducir su costo de producción en línea con la innovación de la tecnología de producción y de los materiales utilizados [2].

La economía del combustible junto con las consideraciones de seguridad son las fuerzas directrices para el constante incremento del uso de aceros de alta resistencia en la industria automotriz [3].

En la industria automotriz se utiliza el proceso de soldadura por resistencia eléctrica por puntos, el cual permite efectuar el ensamble de las distintas piezas que forman la estructura o carrocería. Se considera como el proceso más significativo de unión debido a su alta velocidad y fácil automatización [4].

El presente trabajo trata sobre el estudio de un acero experimental de alta resistencia, el cual fue sometido a un proceso de termogalvanizado y posteriormente se realizó un análisis sobre su soldabilidad mediante el proceso de soldadura por resistencia eléctrica efectuando algunas variaciones en los parámetros de operación del mismo.