UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDABILIDAD DE ACEROS IF TERMOGALVANIZADOS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

TESIS

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

PRESENTA:

LUIS ALBERTO MOYA SALAZAR

CIUDAD UNIVERSITARIA ENERO DE 2005

L.A.M.S.

SOLDABILIDAD DE ACEROS IF TERMOGALVANIZADOS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

TM
Z5853
.M2
FIME
2000
.M625

2005

1020150558

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD.DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDABILIDAD DE ACEROS IF TERMOGALVANIZADOS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

TESIS

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

PRESENTA:

LUIS ALBERTO MOYA SALAZAR

CIUDAD UNIVERSITARIA ENERO DE 2005

FON
ESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDABILIDAD DE ACEROS IF TERMOGALVANIZADOS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

TESIS

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

PRESENTA

LUIS ALBERTO MOYA SALAZAR

CIUDAD UNIVERSITARIA **ENERO 2005**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SOLDABILIDAD DE ACEROS IF TERMOGALVANIZADOS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

TESIS

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

PRESENTA

LUIS ALBERTO MOYA SALAZAR

CIUDAD UNIVERSITARIA **ENERO 2005**

995852

TM
Z5853
.M2
FIME
2005
.M625

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 "Soldabilidad de Aceros IF Termogalvanizados Para Aplicaciones Automotrices", realizada por el Ing. Luis Alberto Moya Salazar, matrícula 0838658, 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. Ignacio Alvarez Elcoro

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

San Nicolás de los Garza; Nuevo León, Enero 2005

DEDICATORIA.

A Dios:

Por obsequiarme la vida y salud necesarias para lograr terminar estudios de postgrado. por hablarme de muchas formas en mi vida, que aunque normalmente no comprendo me señalan el mejor camino. y especialmente por permanecer siempre conmigo, en un rincón de mi corazón. Gracias…

A mis Padres:

Juan José Moya González y Natalia Salazar Mancha, porque siempre me han comprendido. apoyado y ayudado en todos los aspectos de mi vida. Gracias…

A mis Hermanos:

Juan Francisco. Lorena Lissette y Beatriz Adriana porque a pesar de pensar y ser tan diferentes siempre hemos logrado entendernos muy bien e incluso el paso del tiempo nos vuelven poco a poco inseparables. Gracias…

A mis Amigos:

Nuevos y viejos por igual, por su amistad incondicional durante todo este tiempo, por hacer la diferencia en mi vida y por creer en mí cuando más lo he necesitado. Gracias…

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por permitirme ser parte de su alumnado de licenciatura y postgrado durante muchos años.

A CONACYT por el apoyo económico que me brindaron para solventar mis estudios de postgrado, que culminan hoy con el presente trabajo.

A GALVAK, especialmente al Ing. Rene Garza, por haber donado el material y prestado el equipo que fue utilizado para la realización de este trabajo de investigación.

Al personal del laboratorio de Investigación y Desarrollo de GALVAK: Ing. Antonio Maní, Ing. Antonio Sánchez, Ing. Abel González, Ing. Nelly Cárdenas, Ing. Carmen Guerrero, por su ayuda en las pruebas y ensayos realizados.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata por todo su apoyo y entusiasmo en el desarrollo de este trabajo, así como por sus comentarios e interés en el mismo. Pero sobre todo por su excelente calidad humana y paciencia en el trato personal, dedicando siempre a sus alumnos un espacio de su tiempo en su agenda.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz por sus valiosos comentarios y su apoyo incondicional en la elaboración de este trabajo. Y especialmente por el interés y la preocupación que mostró con todos sus alumnos, mostrándose siempre accesible en todo momento.

Al Dr. Ignacio Alvarez Elcoro por su interés en la revisión de este trabajo y sus comentarios al respecto.

A los profesores del PDIM, por todas las clases y enseñanzas compartidas.

A mis diez compañeros de generación (Ere, Nancy, Angie, Mara, Eva, Fer, Carlos, Casta, Moni y Lionel) por todo el tiempo que compartimos dentro y fuera de clases. Y aunque a ritmos diferentes sé muy bien que todos llegáremos a la meta.

A mi linda amiga Frendira por su paciencia, cariño y amistad durante los últimos dos años, con quien coincidí en mil cosas y de quien conservo grandes conversaciones y excelentes momentos que atesoraré toda mi vida, y con quien espero un día ponerme de acuerdo en aquellas pocas cosas que a la fecha no hemos logrado coincidir.

A mis amigos de la cueva: Jorge Niño, Efrén Carrera, Luis Díaz, Marco, Lalo, Ezequiel y Nieto, por todo el tiempo que hemos convivido y los buenos momentos que hemos compartido desde que iniciamos la licenciatura en FIME.

A mis amigos y compañeros del PDIM: a mis vecinas: Dione, Gemma, Teresita y Diana; Lili, Chava, Adela, Alvaro, Angélica, Lalo Rdz., Juanito, Yuri, Mike, Orlando, Oscar, Urueta, Julian, Yadira y Jorge.

A mis amigos de siempre Pedro Luis y Oscar, porque aunque uno es contador y el otro licenciado han sabido entender muy bien a este ingeniero, formando una amistad que prevalece a pesar del tiempo y la distancia.

A todos los miembros de la "raza" por todo el tiempo, los sueños y las aventuras que hemos compartido en la realidad y en la ficción de un juego.

"Muere lentamente quien no viaja, quien no lee, quien no oye música, quien no encuentra gracia en sí mismo. Muere lentamente quien destruye su amor propio, quien no se deja ayudar. Muere lentamente quien se transforma en esclavo del hábito, repitiendo todos los días los mismos trayectos, quien no cambia de marca, no arriesga vestir un color nuevo y no le habla a quien no conoce. Muere lentamente quien hace de la televisión su gurú. Muere lentamente quien evita una pasión, quien prefiere el negro sobre blanco y los puntos sobre las "ies" a un remolino de emociones, justamente las que rescatan el brillo de los ojos, sonrisas de los bostezos, corazones a los tropiezos y sentimientos.

Muere lentamente quien no voltea la mesa cuando está infeliz en el trabajo, quien no arriesga lo cierto por lo incierto para ir detrás de un sueño, quien no se permite por lo menos una vez en la vida, huir de los consejos sensatos. Muere lentamente, quien pasa los días quejándose de su mala suerte o de la lluvia incesante. Muere lentamente, quien abandonando un proyecto antes de iniciarlo, no preguntando de un asunto que desconoce o no respondiendo cuando le indagan sobre algo que sabe."

Pablo Neruda.

What we do in life, echoes in eternity.

(Película Gladiador)

PRÓLOGO.

El presente trabajo de investigación representa la continuación de diversos estudios que se han desarrollado recientemente y que se han enfocado a estudiar los parámetros que controlan el proceso de soldadura de resistencia por puntos de lámina de acero termogalvanizada. Sin embargo, la complejidad que representan las variables del proceso de soldabilidad en productos recubiertos, hace necesario el estudio desde las etapas de fabricación del producto recubierto. El procesamiento de la lámina de acero termogalvanizada involucra fenómenos microestructurales que ocurren en la lámina de acero y en el recubrimiento. En el acero, estos fenómenos son gobernados principalmente por las características físicas y químicas de la lámina. En el recubrimiento, las características químicas del Zinc líquido y las condiciones termodinámicas del tratamiento termogalvanizado hacen mas complejo el procesamiento de estos materiales. Finalmente, el conocimiento del efecto de las variables del proceso de termogalvanizado sobre las propiedades obtenidas en el producto recubierto, permiten optimizar los parámetros de soldadura a utilizar para la obtención de uniones de excelente integridad. De esta forma, el conocimiento generado durante el desarrollo de este estudio contribuye significativamente en el entendimiento y control de las condiciones óptimas operativas de las operaciones de termogalvanizado y de soldadura de resistencia por puntos.

M.C. Antonio Maní Medrano.

ÍNDICE

DEDICATORIA IV

AGRADECIMIENTOS V

PRÓLOGO VII

ÍNDICE VIII

RESUMEN 1

CAPÍTULO I
ACERO LIBRE DE INTERSTICIALES. 2

1.1 INTRODUCCIÓN. 2

1.2 CLASIFICACIÓN. 4

1.3 PROCESAMIENTO. 7

1.3.1 Proceso de obtención 7

1.3.2 Proceso de laminación 8

1.3.3 Recocido 13

1.3.4 Termogalvanizado 14

1.4 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN. 16

1.4.1 Carbono y nitrógeno 16

1.4.2 Titanio y niobio. 17

1.4.3 Azufre 18

1.4.4 Manganeso, silicio y fósforo. 19

1.4.5 Boro 20

1.4.6 Elementos residuales. 20

1.5 PROPIEDADES DE LOS ACEROS IF. 21

1.5.1 Medición de la formabilidad. 21

1.5.2 Aceros IF estabilizados con titanio. 22

1.5.3 Aceros IF estabilizados con niobio. 22

1.5.4 Aceros IF estabilizados con titanio y niobio. 23

1.5.5 Aceros IF estabilizados con vanadio 23

1.6 DESARROLLO Y DESVENTAJAS DE LOS ACEROS IF. 24
1.6.1 Aceros IF endurecidos por horneado (IF BH).....24
1.6.2 Aceros IF de alta resistencia (IF HSS).....25
1.6.3 Fragilización por trabajo en frío secundario (SCWE).....25
1.6.4 Fatiga.....26

CAPÍTULO II
PROCESO DE GALVANIZADO. 27
2.1 INTRODUCCIÓN. 27
2.2 PROCESO CONTINUO DE GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE. 29
2.2.1 Preparación y acondicionamiento de la lámina.....29
2.2.2 Sección de limpieza (oxidación – reducción). 30
2.2.3 Sección de recocido.....32
2.2.4 Sección de recubrimiento.....32
2.2.5 Control de espesor.....33
2.2.6 Tratamientos posteriores.....34
2.2.7 Fosfatizado. 35
2.2.8 Pintado con recubrimientos orgánicos. 36
2.3 SISTEMA DE ALEACIÓN BINARIO Fe – Zn.....38
2.3.1 Diagrama de fases Fe-Zn. 38
2.3.2 Descripción de las fases Fe-Zn. 40
2.3.3 Morfología y formación de las fases Fe-Zn. 41
2.4 MANEJO DEL BAÑO DE ZINC.....43
2.4.1 Influencia de los aleantes en el baño.....43
2.4.2 Bajas adiciones de aluminio.....45
2.4.3 Inhibición de las reacciones Fe-Zn. 47
2.4.4 Formación de escoria. 49
2.5 TERMOGALVANIZADO. 52
2.5.1 Cinética de fases.....53
2.5.2 Parámetros del proceso. 54
2.5.3 Integridad del recubrimiento.....55

2.6 GALVANIZADO DE ACEROS IF. 58
2.6.1 Efectos superficiales. 58
2.6.2 Morfología. 59
2.6.3 Consideraciones adicionales. 61

CAPÍTULO III
SOLDADURA POR RESISTENCIA. 63
3.1 INTRODUCCIÓN. 63
3.2 FUNDAMENTOS DE LA SOLDADURA POR PUNTOS. 66
3.2.1 Generación de calor. 66
3.2.2 Equipo. 68
3.2.3 Electrodos. 69
3.2.4 Disipación de calor. 71
3.3 PARAMETROS DE LA SOLDADURA POR PUNTOS. 72
3.3.1 Ciclos de soldadura. 72
3.3.2 Corriente de soldadura. 73
3.3.3 Fuerza del electrodo. 74
3.3.4 Resistencia del material. 74
3.3.5 Vida útil del electrodo. 75
3.4 SOLDABILIDAD. 78
3.4.1 Curvas de soldabilidad. 78
3.4.2 Estándares de prácticas recomendadas. 80
3.4.3 Estándares de proceso. 80
3.4.4 Estándares de calificación y certificación. 81
3.4.5 Calidad de la soldadura. 82
3.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA RSW. 83
3.6 FACTORES DEL PROCESO QUE AFECTAN LA RSW. 85
3.6.1 Efecto del material de los electrodos. 85
3.6.2 Efecto del diseño de los electrodos. 86
3.6.3 Efecto de la fuerza aplicada. 87
3.6.4 Efecto de la corriente aplicada. 89
3.6.5 Efecto del tiempo de soldadura (WT). 90

3.6.6 Efecto del tiempo de sostenimiento (HT). 91
3.6.7 Efecto de la secuencia de soldadura. 91
3.6.8 Efecto de los tratamientos posteriores a la soldadura. 93
3.7 FACTORES DEL MATERIAL QUE AFECTAN LA RSW. 94
3.7.1 Efecto del espesor de la lámina. 94
3.7.2 Efecto de la composición química del acero. 94
3.7.3 Efecto de la limpieza del acero. 97
3.7.4 Efecto de la condición superficial. 97
3.7.5 Efecto del espesor del recubrimiento. 98
3.7.6 Efecto de la composición química del recubrimiento. 99

CAPÍTULO IV
DESARROLLO EXPERIMENTAL. 100
4.1 INTRODUCCIÓN. 100
4.2 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO. 101
4.3 PREPARACIÓN DEL MATERIAL. 102
4.4 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA. 103
4.4.1 Medición del espesor. 103
4.4.2 Rugosidad superficial. 103
4.4.3 Ensayo de tensión. 104
4.4.4 Preparación de muestras. 105
4.4.5 Análisis químico. 106
4.4.6 Análisis óptico. 107
4.4.7 Ensayos de dureza y microdureza. 108
4.5 CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO. 110
4.5.1 Análisis químico. 110
4.5.2 Análisis óptico. 111
4.5.3 Peso del recubrimiento. 111
4.5.4 Integridad del recubrimiento. 112
4.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELECTRODOS. 114
4.6.1 Tipo de electrodos. 114
4.6.2 Diámetro de la cara. 114

4.6.3 Análisis químico y microestructural. 115
4.6.4 Microdureza. 115
4.6.5 Resistencia eléctrica estática. 115
4.7 PRUEBA DE SOLDABILIDAD. 116
4.7.1 Selección de parámetros y preparación del equipo. 117
4.7.2 Proceso de estabilización. 118
4.7.3 Determinación de valores de Imín y Imáx iniciales. 119
4.7.4 Prueba de la calidad de la soldadura. 119
4.7.5 Prueba de resistencia o vida útil de los electrodos. 120
4.8 EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA. 121
4.8.1 Evaluación del botón de soldadura. 121
4.8.2 Evaluación de microdureza y microestructura. 121
4.8.3 Ensayo de arranque. 123
4.8.4 Ensayos de tensión a corte. 125

CAPÍTULO V
RESULTADOS. 126
5.1 INTRODUCCIÓN. 126
5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO. 127
5.3 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO. 129
5.4 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA. 130
5.4.1 Medición del espesor. 130
5.4.2 Rugosidad superficial. 130
5.4.3 Ensayo de tensión. 131
5.4.4 Análisis químico. 132
5.4.5 Análisis óptico. 133
5.4.6 Ensayos de dureza y microdureza. 135
5.5 CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO. 136
5.5.1 Análisis químico. 136
5.5.2 Análisis óptico. 138
5.5.3 Peso del recubrimiento. 140
5.5.4 Integridad del recubrimiento. 142

5.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELECTRODOS. 144
5.6.1 Microestructura y microdureza. 144
5.6.2 Deterioro de la cara de los electrodos. 145
5.6.3 Sección transversal del electrodo. 146
5.7 PRUEBAS DE SOLDABILIDAD. 150
5.7.1 Inspección visual. 150
5.7.2 Análisis microestructural. 151
5.7.3 Corriente de soldadura. 151
5.7.4 Ensayos de arranque y de resistencia a la tensión a corte. 153
5.7.5 Inspección y evaluación dimensional del botón de soldadura. 155
5.7.6 Ensayo de microdureza. 160
5.7.7 Prueba de resistencia. 160
5.7.8 Defectos de la soldadura. 162

CAPÍTULO VI
DISCUSIÓN DE RESULTADOS. 165
6.1 INTRODUCCIÓN. 165
6.2 PROCESAMIENTO. 166
6.3 MATERIAL. 166
6.3.1 Metal base. 166
6.3.2 Recubrimiento. 168
6.4 SOLDABILIDAD. 171
6.4.1 Electrodos. 171
6.4.2 Prueba de calidad de la soldadura. 173
6.4.3 Prueba de resistencia. 177
6.4.4 Defectos. 178

CAPÍTULO VII
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 180
7.1 CONCLUSIONES. 180
7.2 RECOMENDACIONES. 183

ANEXO A
DESCRIPCIÓN DE PROCESOS.....185

A.1 PROCESO DE ESTABILIZACIÓN [80].....185

A.2 DETERMINACIÓN DE VALORES DE $I_{MÁX}$ Y I_{MIN} INICIALES [80].....186

A.3 PRUEBA DE CALIDAD DE LA SOLDADURA [80].....187

A.4 PRUEBA DE RESISTENCIA O VIDA ÚTIL DEL ELECTRODO [80].....190

ANEXO B
RESULTADOS.....192

B.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE ARRANQUE.....192

B.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN A CORTE.....193

B.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL.....194

B.4 RESULTADOS DE MICRODUREZA.....195

B.5 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA.....197

REFERENCIAS.....199

LISTADO DE FIGURAS.....207

LISTADO DE TABLAS.....210

RESUMEN

Una buena calidad en la soldadura de los aceros termogalvanizados depende directamente del tipo y calidad del recubrimiento, los cuales a su vez varían con las condiciones del procesamiento utilizado, los de mayor impacto son el contenido de aleantes en la paila (aluminio, antimonio y plomo), el espesor final del recubrimiento y el contenido de hierro en el mismo como resultado de las condiciones operativas del horno de termogalvanizado.

Los aceros libres de intersticiales o IF, por sus siglas en inglés, fueron introducidos en Japon en los 70's y son considerados el material con la mejor calidad para embutido superando ampliamente a los AKDQ (calmados al aluminio, calidad embutido profundo), por lo que son ampliamente utilizados por la industria automotriz.

El propósito de este trabajo es investigar el efecto del contenido de Sb en la paila, así como las condiciones de procesamiento de termogalvanizado en la soldabilidad por resistencia eléctrica de aceros IF y mostrar el efecto de estas características en la calidad de las soldaduras utilizando como parámetros de medición y aceptación la inspección visual de los puntos de soldadura, el rango de corriente, análisis dimensional del botón de soldadura, análisis microestructural, ensayo de microdureza en sección transversal del boton de soldadura, resistencia máxima a tensión directa y a corte. Se realizaron pruebas a dos diferentes tiempos de sostenimiento para analizar la sensibilidad del material de prueba, y se mantuvieron constantes las condiciones y parámetros relativos al proceso de soldadura y el material del substrato empleado.

Se consideraron además los efectos sobre la vida útil de los electrodos, al promover la formación de fases cobre-zinc y la adherencia del recubrimiento sobre la cara de los mismos, analizando también la deformación de los electrodos y la evolución de la geometria de contacto en las caras de los electrodos.