UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

CINETICA DE CRECIMIENTO, MECANISMOS DE REMOCION Y MORFOLOGIA DEL OXIDO DE HIERRO EN ACEROS LAMINADOS EN UNA PLANTA COMPACTA DE PRODUCTOS PLANOS

POR

JORGE RAMIREZ CUELLAR

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

ENERO DEL 2005

J. R. C.

CINETICA DE CRECIMIENTO, MECANISMOS DE REMOCION Y MORFOLOGIA DEL OXIDO DE HIERRO EN ACEROS LAMINADOS EN UNA PLANTA COMPACTA DE PRODUCTOS PLANOS

TD
Z5853
.M2
FIME
2005
R324

2005

1020150362

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

CINETICA DE CRECIMIENTO, MECANISMOS DE REMOCION Y MORFOLOGIA DEL OXIDO DE HIERRO EN ACEROS LAMINADOS EN UNA PLANTA COMPACTA DE PRODUCTOS PLANOS

POR

JORGE RAMIREZ CUELLAR

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

ENERO DEL 2005

996176

TD
Z5953
.1
1 IM-
200.
K324

FONDO
TESIS

25 1 06 J.N.

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 **"Cinética de Crecimiento, Mecanismos de Remoción y Morfología del Óxido de Hierro en Aceros Laminados en una Planta Compacta de Productos Planos"** realizada por el M.C. Jorge Ramírez Cuéllar sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería de Materiales.

El comité de tesis

Asesor
Dr. Rafael Colás Ortiz

Asesor
Dr. Luis A. LeDuc Lezama

Revisor
Dra. Martha P. Guerrero Mata

Revisor
Dr. Carlos J. Lizcano Zulaica

Revisor
Dr. Rafael D. Mercado Solís

Vo.Bo.
Dr. Guadalupe A. Castillo Rodríguez

San Nicolás de los Garza; Nuevo León. Enero de 2005

DEDICATORIA

A Dios por darme la fortaleza para llegar ha esta nueva etapa de mi vida.

A mis padres José S. y Enedelia, a mi esposa Anita, a mi hija Jocelyn y a mi hijo Jorge por su apoyo y cariño en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa HYLSA S.A. de C.V. por su apoyo económico de recursos humanos y materiales durante todo este estudio.

A los Ingenieros Felipe de J. Garza Medina, Héctor J. Cuéllar Támez, Félix E. Cárdenas Villarreal directivos de HYLSA así como al Dr. Luis A. LeDuc Lezama Gerente de Procesos Molinos Calientes por haberme apoyado para que pudiese realizar mis estudios de Postgrado.

A la subdirección Acerias Molinos dirigida por el Ing. Rafael González de la Peña en sus diferentes departamentos de producción, mantenimiento y procesos que gracias al trabajo en equipo fue posible entender los mecanismos causantes del óxido primario. Así como por las facilidades dadas para la realización de las pruebas en la planta.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por su apoyo en la parte académica.

A mi asesor el Dr. Rafael Colás Ortíz por su apoyo amistad y paciencia en la revisión corrección y asesoria en toda la etapa de mi trabajo de tesis y estudios de Postgrado.

A la Doctora Martha P. Guerrero Mata así como a los Doctores Rafael D. Mercado Solís y Carlos Lizcano Zulaica por aceptar el revisar de forma muy profesional y desinteresada mi trabajo de tesis.

A los laboratorios del CINVESTAV Unidad Saltillo por su valioso apoyo y en especial al Dr. Armando Salinas Rodríguez, así como a los laboratorios de GALVAK S.A. de C.V. y de HYLSA, por el soporte en la caracterización de las muestras y pruebas realizadas.

Y finalmente a todos mis compañeros de trabajo, de estudio y amigos, a todos ellos muchas gracias...

PRÓLOGO

Los mecanismos de generación del óxido laminado y la forma de eliminarlo sobre una cinta de acero han sido estudiados desde que existe la laminación en caliente y de manera formal a principios del siglo pasado, sin embargo a pesar de que existen muchos estudios al respecto el problema aún persiste, y las causas raíz siguen sin ser comprendidas completamente.

El entendimiento de estos mecanismos en una planta del tipo compacta de tecnología Alemana cuyas primeras plantas fueron construidas en los Estados Unidos a finales de la década de los 80´s son todavía menos estudiados y menos comprendidos.

Los principales beneficios obtenidos de esta investigación fueron los siguientes:

Una mejor comprensión de los mecanismos causantes del óxido primario laminado en una planta compacta (CSP).

Se obtuvo una disminución cercana del 80% de menos desviaciones de material por óxido primario.

De forma adicional y no fácilmente cuantificable se mejoraron las entregas oportunas al cliente, así como una disminución en las reprogramaciones y los inventarios de rollos.

Estoy convencido que el objetivo fue alcanzado, espero además que se generen nuevas líneas de investigación en la búsqueda de mejores condiciones en la operación y en la producción que minimicen aún más este problema, disminuyendo desperdicios en aras de la mejora en la calidad de la superficie en la cinta y la optimización de los recursos cada vez más limitados.

ÍNDICE.

Pág.

Dedicatoria. I
Agradecimientos. II
Prólogo. III

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Descripción del proceso y una comparación con otros laminadores. 1

1.2. Objetivo de este estudio. 3

1.3. Estructura de este estudio. 3

Figuras. 6

Capítulo 2. Descripción del crecimiento y rompimiento del óxido a altas temperaturas.

2.1. Introducción. 10

2.2. Tipos de óxido a las altas temperaturas de laminación. 11

2.3. Difusión de los elementos que forma el óxido en sus diferentes fases. 13

2.4. Primeros estudios del crecimiento del óxido de hierro. 13

2.5. Relación de Pilling y Bedworth para la adherencia o fractura de los óxidos en superficies. 14

2.6. Proceso inicial de absorción y nucleación del óxido de hierro. 15

2.6.1. Diferentes velocidades de oxidación. 15

2.6.1.1 Oxidación lineal. 15

2.6.1.2 Oxidación parabólica. 16

2.6.1.3. Oxidación paralineal. 16

2.7. Difusión a través del óxido, ley de Fick. 16

2.8. Teoría simplificada de la oxidación de Wagner. 18

2.9. Crecimiento del óxido en el colado y horno túnel. 20

2.9.1. Factores que modifican los niveles de oxígeno en el horno túnel. 21

2.10. Modelos para predecir los espesores de óxido en diferentes atmósferas. 23

2.10.1. Coeficientes de crecimiento en atmósferas de hornos convencionales. 23

2.10.2. Crecimiento del óxido en función de diversos factores. 24

2.10.3. Modelos utilizados que calculan la ganancia en peso. 26

2.11. Modelo de generación de los esfuerzos al crecer el óxido. 28

2.12. Modelo de generación de esfuerzos en el óxido bajo el concepto de expansión volumétrica. 30

2.13. Modelo de esfuerzos inducidos térmicamente. 32

2.14. Diferencia de temperatura requerida para la fractura de la capa de óxido. 34

2.15. Modelo de fractura del óxido al ser deformado sobre un sustrato metálico. 36

Resumen. 37

Figuras. 38

Tablas. 46

Capítulo 3. Mecanismo de remoción del óxido por el descascarado.

3.1. Introducción. 50

3.2. Mecanismo de remoción de la capa de óxido por medio del descascarado. 51

3.2.1. Fuerza del agua sobre el óxido. 53

3.2.2. Cálculo del impacto del agua sobre la capa de óxido. 55

3.2.3. Cantidad de agua en función de la velocidad y ancho del chorro. 56

3.2.4. Influencia del ángulo de inclinación y la presión del agua sobre el enfriamiento del óxido. 57

3.3. Impacto sobre la superficie del planchón considerando al agua como una gran cantidad de gotas. 58

3.4. *Efecto del espesor, la temperatura del óxido y la presión del agua en la remoción.* 61

3.5. Parámetros del descascarado del laminador compacto. 61

3.6. Parámetros del descascarado de un laminador convencional. 63

Resumen. 64

Figuras. 65

Tablas. 72

Capítulo 4. Crecimiento del óxido durante la laminación en caliente.

4.1. Introducción. 75

4.2. Principales datos técnicos y crecimiento del óxido del laminador en caliente compacto. 76

4.3. Pérdidas de temperatura del planchón al ser reducido en sus diferentes pases de laminación. 77

4.4. Pérdida de temperatura por efecto del descascarado. 78

4.5. Pérdida de temperatura del planchón por radiación entre los castillos. 80

4.6. Pérdida de calor por contacto planchón rodillo de trabajo. 81

4.7. Incremento en la temperatura debido a la reducción del planchón. 82

4.7.1. Cálculo del esfuerzo a la cedencia con las condiciones de laminación. 83

Resumen. 87

Figuras. 88

Tablas. 91

Capítulo 5. Experimentación.

5.1. Introducción. 94

5.2. Pruebas en planta. 94

5.2.1. Pérdida en peso del acero dentro del horno túnel. 94

5.2.2. Variación de las condiciones de proceso de planchones en el horno túnel. 95

5.2.3. Variación de las condiciones de proceso entre la salida del horno túnel y el descascarado. 96

5.2.4. Efecto al agregar cascarilla a la entrada del primer castillo y polvo de molde sobre el planchón a la entrada del horno túnel. 97

5.3. Pruebas realizadas en el laboratorio de HYLSA y CINVESTAV con polvo de molde, agregado a muestras de lámina. 97

5.4. Microscopía óptica para medir el espesor de óxido secundario en el laminador compacto. 98

5.5. Microscopía electrónica a las muestras de óxido del laboratorio y de la planta. 98

5.6. Difracción de rayos X, a muestras de óxido y cascarilla pegada a los rodillos del horno túnel. 99

Figuras. 100

Tablas. 101

Capítulo 6. Resultados.

6.1. Pruebas industriales para producir óxido laminado. 104

6.1.1. Introducción. 104

6.1.2. Efecto de variar la temperatura del planchón dentro del horno túnel para un mismo acero. 104

6.1.3. Resultados de utilizar las dos máquinas de colado a temperatura del horno túnel de 1150 °C y 1050 °C sobre la cantidad de óxidos laminados. 105

6.1.4. Efecto de usar una máquina de colado a dos temperaturas de salida del horno túnel 1085 °C y 1000 °C y los óxidos laminados en la cinta decapada. 105

6.1.5. Resultados de probar el trabajar con un solo horno túnel. 105

6.1.6. Resultados en la aparición del óxido laminado en la cinta al utilizar el cabezal de enfriamiento a la salida del horno túnel. 105

6.1.7. Resultados en la aparición del óxido al utilizar diferente número de bombas de alta presión, con las mismas de baja presión. 106

6.1.8. Efectos en la aparición del óxido utilizando cinco bombas de alta presión, levantado el primer y segundo caracol de forma independiente. 106

6.1.9. Resultados al agregar cascarilla a la entrada del primer castillo sobre la aparición del óxido laminado en los rollos. 106

6.1.10. Cantidad de marcas por la cara inferior generadas por las ruedas de de los rodillos del horno túnel y que producen óxido laminado. 107

6.1.10.1 Diferencias en el procesamiento en dos lotes, uno con y uno sin óxido laminado, por la cara inferior de la cinta decapada. 107

Figuras. 108

Tablas. 110

6.2. Predicción y medición del óxido en la planta compacta. 116

6.2.1. Introducción. 116

6.2.2. Crecimiento del óxido en la zona de colado. 116

6.2.3. Crecimiento de óxido en el horno túnel y un comparativo con hornos convencionales. 117

6.2.4. Crecimiento del óxido después del descascarado. 118

6.2.5. Espesores de óxido secundario en un laminador convencional y el compacto. 119

6.2.6. Fractura de la capa de óxido en el laminador compacto. 120

6.2.6.1. Comparación de la fractura del óxido en un laminador convencional y el compacto. 120

Figuras. 121

6.3. Medición y predicción del rompimiento del óxido por el descascarado. 134

6.3.1. Introducción. 134

6.3.2. Temperaturas, velocidades y espesores de óxido a la entrada del descascarado. 134

6.3.3. Cálculo de la fuerza, el impacto, la cantidad de agua y los esfuerzos térmicos al descascarar. 134

6.3.4. Variables que evitan la remoción del óxido primario. 135

6.3.5. Fracción de agua que se impacta en el planchón en función de la velocidad. 136

6.3.6. Cantidad de agua, impacto, esfuerzos térmicos y fracción de agua del descascarado de un laminador convencional. 136

Figuras. 138

Tablas. 146

6.4. Caracterización del óxido laminado. 147

6.4.1. Introducción. 147

6.4.2. Comparación entre los espesores de óxido primario y secundario. 147

6.4.3. Estudio del óxido por microscopía electrónica de barrido. 148

6.4.4. Reacción del acero con polvo de molde. 148

6.4.5. Resultados de la adición de polvo de molde a la entrada del horno túnel. 149

6.4.6. Caracterización del óxido secundario. 149

6.4.7. Resultados de agregar cascarilla a la entrada del primer castillo. 150

6.4.8. Principal mecanismo de formación del óxido laminado por la cara inferior. 150

Figuras. 151

Tablas. 167

Capítulo 7. Discusión.

7.1. Predicción, medición, caracterización y pruebas del óxido formado en el horno túnel. 168

7.1.1. Efecto que ejercen las variables de proceso sobre la aparición del óxido laminado. 168

7.1.2. Cantidad de marcas por la cara inferior generadas por las ruedas de los rodillos del horno túnel y que producen óxido laminado. 169

7.1.3. Crecimiento del óxido en la zona de colado. 171

7.1.4. Crecimiento del óxido en el horno túnel y un comparativo con hornos convencionales. 172

7.1.5. Comparación entre los espesores y características del óxido primario y secundario. 174

7.1.5.1. Magnitudes de los espesores de ambos tipos de óxidos. 174

7.1.5.2. Características morfológicas y químicas de ambos óxidos. 175

7.1.5.3. *Efecto de la presencia de silicio y calcio en el óxido* primario. 176

7.1.5.4. Mecanismo de formación del óxido primario en la planta compacta. 178

7.2. Modelación y pruebas del descascarado sobre la aparición del óxido laminado en la cinta. 181

7.2.1. Efectos en la aparición del óxido utilizando cinco bombas de alta presión levantando el primer y segundo caracol de forma independiente. 182

7.2.2. Modelación del descascarado y análisis de los datos de proceso de éste sobre el óxido primario. 182

7.2.3. Cantidad de agua, impacto, esfuerzos térmicos y fracción de agua del descascarado de un laminador convencional. 186

7.3. Crecimiento y caracterización del óxido secundario. 187

7.3.1. Fractura de la capa de óxido secundario en el laminador compacto. 189
7.3.2. Caracterización del óxido secundario. 189

Figuras. 191

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones.

8.1. Pruebas en planta. 196
8.2. Óxido en la zona de colado. 197
8.3. Óxido en la zona del horno túnel. 197
8.4. Descascarado. 198
8.4.1. Diferencias en los descascarados de un laminador convencional y el compacto. 199
8.5. Óxido en la zona de laminación en la planta compacta. 200
8.5.1. Comparativo con el laminador convencional. 200
8.6. Caracterización del óxido laminado. 201
8.7. Recomendaciones. 202
Bibliografía. 205
Anexo I. Beneficios obtenidos y artículos presentados. 217
Listado de Figuras. 254
Listado de Tablas. 263
Listado de Símbolos. 266
Resumen autobiográfico. 271