UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON FACULTAD DE INGENERIA MECANICA Y BLECTRICA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



CARACTERIZACION TERMICA Y VISIOPLASTICA DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE

TESIS

EN OPCION AL GRADO EN MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

POR

MANUEL GUADALUPE RODRIGUEZ RODRIGUEZ

CD. UNIVERSITARIA

MARZO DE 2001

CARACTERIZACION TERMICA Y VISIOPIASTICA DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



CARACTERIZACION TERMICA Y VISIOPLASTICA DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE

TESIS

EN OPCION AL GRADO EN MAESTRO EN CIENCIAS

DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD

EN MATERIALES

POR

MANUEL GUADALUPE RODRIGUEZ RODRIGUEZ

CD. UNIVERSITARIA

MARZO DE 2001

74 25853 • Ma FIME 2001 R62



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICAY ELÉCTRICA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y VISIOPLÁSTICA DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

POR MANUEL GUADALUPE RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

CD. UNIVERSITARIA

MARZO DE 2001

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Caracterización térmica y visioplástica de aceros laminados en caliente" realizada por el Ing. Manuel Guadalupe Rodríguez Rodríguez 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

Dr. Rafael Colás Ortiz

' Coasesor

Dra. Martha Guerrero Mata

Coasesor

Dr. Eduardo Valdés Covarrubias

M.C. Roberto Villarreal Garza

División de Estudios de Postgrado

√o.Bo.

San Nicolás de los Garza, N.L., Marzo de 2001

Los sujetos que sufren grandes delirios científicos, matemáticos o filosóficos están convencidos del carácter revolucionario de su lucidez o descubrimiento y de la importancia universal de sus ideas, sin embargo su reconocimiento y trascendencia se logra cuando son comprendidas por la sociedad y son utilizadas en su beneficio, de otra manera tales sujetos no dejan de ser enfermos delirantes o inventores desconocidos que viven su descrédito como una persecución.

MGR

AGRADECIMIENTOS

A Jehová, por todo.

A mis padres y hermanos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico recibido para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL.

Al Instituto Tecnológico de Saltillo.

A mi asesor, Dr. Rafael Colás Ortiz por su acertada dirección y asesoría, su apoyo y amistad.

Al Dr. Eduardo Valdés Covarrubias por su ayuda y disposición.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata por su colaboración.

Al Dr. Luis Leduc Lezema y su equipo de colaboradores, por su disposición y ayuda en la recopilación del material para la realización de este trabajo.

A todos los profesores del PDIM, por compartir conmigo sus conocimientos, experiencia y sus libros de una manera incondicional. A todos mis compañeros del PDIM, por su amistad y compañerismo.

PROLOGO

El acero es sin lugar a dudas la familia de aleaciones más utilizada en la actualidad por el ser humano. A pesar de la creciente competencia que día a día presentan otros materiales metálicos y no metálicos, el uso del acero sigue siendo primordial en muchas industrias, entre ellas, la de la construcción, infraestructura, transportación, metal-mecánica, eléctrica, automotriz, etc.

La competencia por ocupar mercados ya establecidos o mercados emergentes, obliga al industrial siderúrgico a optimizar sus procesos de fabricación a fin de ofrecer un producto que satisfaga las crecientes necesidades técnicas, económicas y logísticas de la industria actual. Es precisamente en el campo de la optimización del proceso de laminación en caliente, donde se enfoca el presente trabajo.

El proceso de laminación en caliente, ya sea de productos planos o secciones, constituye una etapa fundamental en el procesamiento de los acero. El caso particular de una línea productiva de lámina de acero incluye una serie de estaciones en las que la pieza es deformada al entrar en contacto con los rodiltos de trabajo. La fricción existente entre estos utensilios y el acero provoca que éste cambie de forma.

La fricción es fundamental para llevar a cabo el procesamiento y, como consecuencia, se generan esfuerzos cortantes cuya magnitud decrece de la superficie al centro de la pieza, lo que a su vez ocasiona heterogeneidades en la distribución de la deformación. En este trabajo se presenta una metodología experimental para cuantificar estos gradientes. Se parte de la inscripción de una retícula en el plano central de la pieza a deformar, de ahí se procede a calentar las piezas hasta su temperatura de trabajo y se laminan. Una vez deformadas la retícula se extrae, se registran las coordenadas y se obtiene la distribución.

La experimentación se realizó en piezas provenientes de cuatro tipos de acero diferente que fueron maquinadas en forma de cuña, con lo que fue posible variar la reducción de laminación en una misma muestra. Adicionalmente, se tuvo el cuidado de insertar una serie de termopares a los especímenes experimentales para guardar el registro de la evolución térmica. Una vez concluidas las pruebas, la información térmica se procesó y se detectaron las temperaturas críticas de transformación.

El estudio se complementó con la evaluación de los cambios microestructurales en las muestras, lo que permitió dilucidar el efecto de la composición química y de la deformación plástica sobre el tamaño de grano final.

Las actividades realizadas a lo largo de esta investigación han permitido obtener una serie de datos relacionados con el comportamiento del acero al ser deformado y puede ser de gran utilidad para el sector siderúrgico al emplear esta información para mejorar sus procesos productivos.

Con la seguridad de ver implementadas en la planta productiva de la industria siderúrgica nacional las aportaciones aquí logradas, el presente trabajo se enmarca en una, ya larga tradición de exitosa cooperación entre la industria y la academia.

Alberto Pérez Unzueta Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Universidad Autónoma de Nuevo León Marzo del 2001

INDICE

REFLEXION AGRADECIMIENTOS PROLOGO RESUMEN CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	<i>pag</i> . i ii iii iv 1
1.1 Introducción 1.2 Proceso industrial 1.3 El molino continuo 1.4 Objetivo del trabajo 1.5 Contribución	1 2 5 8 9
CAPITULO 2 ANÁLISIS DE LA FLUENCIA DEL METAL	10
2.1 Introducción2.2 Patrones de fluencia2.3 Teorías y métodos utilizados en el análisis del proceso de laminación	10 11 16
 2.3.1 Teoría de deformación homogénea 2.3.2 Teoría de deformación heterogénea 2.3.3 Método de campos de líneas de deslizamiento 	17 17 18
2.3.4 Método de elemento finito 2.3.5 Método de los teoremas de limite 2.3.6 Método de visioplasticidad	20 22 22
2.3.6.1Determinación de los valores de deformación	24
2.3.7 Dispersión lateral del material durante la laminación	28
CAPITULO 3 TRANSFORMACIÓN DE FASE EN ACEROS	30
 3.1 Introducción 3.2 Transformación Austenita – Ferrita 3.3 Efecto de la deformación previa a la transformación de la austenita 	30 32 33
3.3.1 Transformación de la austenita recristalizada	38
3.3.2 Transformación de la austenita deformada	38

CAPITULO 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL	40
 4.1 Materiales 4.2 Composición química 4.3 Preparación de probetas 4.4 Desarrollo del ensayo 4.5 Análisis Visioplástico 4.6 Análisis térmico 4.7 Análisis metalográfico 	40 40 41 44 45 51
CAPITULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
5.1 Caracterización del material base	56
5.1.1 Caracterización macroestructural5.1.2 Caracterización microestructural5.1.3 Caracterización mecánica	56 56 60
5.2 Análisis de las probetas de laminación	63
5.2.1 Resultados del análisis visioplástico5.2.2 Resultados de la caracterización microestructural	63 79
5.2.3 Resultados del análisis térmico	84
5.3 Relación entre los diferentes resultados	90
CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
6.1 Conclusiones6.2 Recomendaciones para posibles trabajos futuros	92 94
REFERENCIAS	95
APÉNDICE A1 PRUEBAS MECANICAS DEL METERIAL BASE	99
APÉNDICE A2 ANÁLISIS VISIOPLÁSTICO DE LAS PROBETAS LAMINADAS	105
APÉNDICE A3 CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LAS PRUEBAS DE LAMINACIÓN	121
APÉNDICE A4 MICROGRAFIAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS CUATRO ACEROS	133
APÉNDICE A5 EVOLUCION DEL TAMAÑO DE GRANO FERRITICO REGISTRADO EN LAS MUESTRAS LAMINADAS	140
APÉNDICE A6 TEMPERATURAS DE TRANSFORMACIÓN CALCULADAS	145

RESUMEN

El proceso de laminación en caliente, ya sea de productos planos o secciones, constituye una etapa fundamental en el procesamiento de los aceros. El caso particular de una linea productiva de lámina de acero incluye una serie de estaciones en las que la pieza es deformada al entrar en contacto con los rodillos de trabajo. Para este trabajo se consideraron cuatro grados de acero, que son procesados cotidianamente en la línea industrial de una planta de la localidad, con la finalidad de ampliar el conocimiento del producto durante su procesamiento y complementar la caracterización de estos aceros y así aportar información para mejorar el proceso productivo y fortalecer su control.

La fricción existente entre los rodillos de laminación y el acero provoca que éste cambie de forma y, como consecuencia, se generan esfuerzos cortantes cuya magnitud decrece de la superficie al centro de la pieza, lo que a su vez ocasiona heterogeneidades en la distribución de la deformación. En este trabajo se aplica el análisis visioplástico como método de análisis para cuantificar estos gradientes, haciendo uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes, además se presenta una caracterización de la deformación lateral experimentada por los distintos aceros bajo estudio.

La experimentación se realizó a partir de probetas provenientes de los cuatro tipos de acero, que fueron maquinadas en forma de cuña, las cuales fueron seccionadas a la mitad en dirección de su longitud, a la primera mitad se le inscribió una retícula de dimensiones conocidas, la segunda mitad se utilizó como muestra testigo de la evolución térmica, para lo cual se insertaron una serie de termopares. Las mitades se unen de manera que la retícula inscrita quede al centro de la probeta, se procede a calentar las piezas hasta su temperatura de trabajo y se laminan. Una vez deformadas la retícula se extrae, se registran las coordenadas y se obtiene la distribución, se procesa la información térmica y se detectan las temperaturas críticas de transformación.

El estudio se complementó con la evaluación de los cambios microetructurales en las muestras, lo que permitió aclarar el efecto de la composición química y la deformación plástica sobre el tamaño de grano final. Las actividades realizadas a lo largo de esta investigación han permitido obtener una serie de datos relacionados con el comportamiento del acero al ser deformado necesarios para mejorar el control del proceso.

Manuel G. Rodríguez R.

U.A.N.L. marzo de 2001