

Estudio del Comportamiento Termomecánico de Aceros Especiales Sometidos a Velocidades de Enfriamiento Elevadas para Lograr Ultra Alta Resistencia

Study on the Thermomechanical Behaviour of Ultra High Strength Steels Treated Under Severe Cooling Rates

Presentación: 06/10/2020

Doctorando:

Matías Ezequiel Ramírez

Grupo Tecnología de Procesos, Centro de Investigaciones y Transferencia de San Nicolás, Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
maramirez@frsn.utn.edu.ar

Directora:

Elena Brandaleze

Resumen

Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) reúnen una serie de importantes beneficios tales como bajo costo de fabricación, capacidad para reducir el peso de la chapa, mejorar la seguridad de los pasajeros, reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y mejorar la capacidad de reciclado que los aceros convencionales. Particularmente, los aceros Dual-Phase (DP) tienen la ventaja de presentar únicas propiedades mecánicas, a partir de un adecuado control en el proceso de fabricación industrial (laminación en caliente), para generar una estructura bifásica de ferrita-martensita o ferrita-bainita. Dado que la laminación en caliente es la ruta de fabricación, se ve que en ella existen dos fenómenos que actúan conjuntamente: por un lado, el sistema experimenta una deformación plástica, mientras que por otra parte, existe el aporte de energía calórica para promover los fenómenos de transformación de fases en el estado sólido. Por este motivo, en este trabajo se hará hincapié en estudiar la correlación existente entre el comportamiento termomecánico de un acero Dual-Phase y el impacto sobre las variables de procesamiento industrial. Para lograr tal fin, se empleará como técnica experimental el ensayo de dilatometría para el estudio de las transformaciones de fases. Este ensayo fue llevado a cabo en un equipo Theta Dilatronics II. Las muestras preparadas consisten en prismas de sección cuadrada de (5 x 5 x 50) mm, las cuales se ensayaron a una velocidad de calentamiento de 0,17 °C/s, hasta una temperatura de 1150 °C. Posteriormente, el enfriamiento se realizó a diversas velocidades de enfriamiento, comprendidas entre 0,03 °C/s hasta 100,00 °C/s. Cada espécimen fue ensayado en atmósfera de aire. Asimismo, toda esta información se correlaciona con estudios estructurales, para determinar la distribución y porcentaje de fases presentes para cada perfil térmico ensayado, así como también la determinación de la resistencia mecánica de cada muestra de acero a partir de la medición de microdureza Vickers.

Palabras clave: Aceros Dual-Phase, Dilatometrías, Transformaciones de Fases, Estructura Bainítica.

Abstract

Advanced High Strength Steels (AHSS) provide several important benefits such as low cost to manufacture, ability to reduce sheet weight, improve passenger safety, reduce carbon dioxide emissions to the atmosphere, and improve recyclability than conventional steels. Dual-Phase (DP) steels have the advantage of presenting unique mechanical properties, based on adequate control in the industrial manufacturing process (hot rolling), to generate a Dual-Phase ferrite-martensite or ferrite-bainite structure. Since hot rolling is the manufacturing route, it is seen that there are two phenomena that act together: on the one hand, the system undergoes a plastic deformation, while on the other hand,

there is the contribution of heat energy to promote the phase transformation phenomena in the solid state. For this reason, in this work emphasis will be placed on studying the correlation between the thermomechanical behavior of a Dual-Phase steel and the impact on the industrial processing variables. To achieve this aim, the dilatometry test for the study of phase transformations will be used as an experimental technique. This test was carried out on a Theta Dilatronics II equipment. The prepared samples consist of (5 x 5 x 50) mm square section prisms, which were tested at a heating rate of 0.17 ° C/s, up to a temperature of 1150 ° C. The cooling was carried out at various cooling rates, from 0.03 ° C/s to 100.00 ° C/s. Each specimen was tested in an air atmosphere. Likewise, all this information is correlated with structural studies, to determine the distribution and percentage of phases present for each thermal profile tested, as well as the determination of the mechanical resistance of each steel sample from the Vickers microhardness measurement.

Keywords: Dual-Phase Steels, Dilatometry, Solid-State Phase Transformations, Bainitic Structure.

Introducción

Las actuales tendencias en el desarrollo de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), en gran medida son motivadas por el nuevo entorno de los usuarios finales. También inciden las regulaciones a las que se enfrentan los fabricantes de automóviles en cuanto a las normas actuales asociadas a la seguridad y al consumo de combustible, (Fonstein, 2015). Existen ciertos factores inherentes al sector automotriz, que influyen sobre el futuro de la industria. Dichos factores se pueden dividir en dos categorías (Sica et. al, 2012):

- Un primer grupo contempla los factores externos asociados a aquellas cuestiones externas al sector automotriz, respectivamente. Dentro de este grupo se puede mencionar el contexto macroeconómico, la situación socioeconómica y demográfica, la cuestión energética, las políticas públicas y las cuestiones medioambientales.
- Un segundo grupo involucra todas aquellas cuestiones que se encuentran vinculadas directamente a la industria automotriz, los cuales se designan con el nombre de factores internos. Dentro de esta categoría se encuentran los mercados, las empresas terminales, la industria de autopartes y la tecnología.

Dentro del grupo de los factores internos, la tecnología es la que permite definir los ejes centrales del desarrollo a nivel automotriz, que podrían marcar en gran medida la tendencia en la fabricación de vehículos y sus componentes. Las cuestiones que son de gran relevancia para la industria, y que deberá tener presente en el diseño tecnológico, se puede resumir de la siguiente forma (Sica et. al, 2012):

- *Reducción de los niveles de contaminación:* basado fundamentalmente en nuevas regulaciones gubernamentales, en las que la emisión de dióxido de carbono (CO₂) y la contaminación producida por los medios de transporte, requieren de vehículos con mejor performance.
- *Disponibilidad energética:* basado en el análisis de los recursos energéticos que puedan marcar la tendencia de las tecnologías en cuanto a su disponibilidad en el futuro y la forma de obtención de energías alternativas.
- *Aumento de la seguridad:* tiene relación directa con la vida del ser humano y la calidad de esta frente a situaciones producidas por accidentes, así como de su entorno.
- *Mejoras de las condiciones de confort del conductor y de los pasajeros:* basado en el aprovechamiento de las innovaciones tecnológicas que ofrece la industria electrónica, la masificación de aplicaciones de internet y conectividad, la evolución de nuevos materiales, etc.

Dentro de la tecnología, el diseño de nuevos aceros para la producción de las carrocerías marca la tendencia actual en la investigación de estos nuevos materiales. Se requieren que los nuevos aceros guarden una relación entre excelentes propiedades mecánicas y una óptima capacidad para el conformado de la chapa durante el proceso productivo. Por esta razón, resulta fundamental poder comprender y profundizar el estudio de los fenómenos que toman lugar durante las transformaciones de fases en el estado sólido de los aceros, respectivamente. Estas transformaciones se verán fuertemente vinculadas a la velocidad de enfriamiento a la cual se somete el material durante el proceso de conformación plástica en caliente, promoviendo de esta forma la generación de ciertas microestructuras, como lo son las bainitas y martensitas, que le confieren al acero elevadas propiedades mecánicas. Asimismo, se puede obtener una estructura de grano ultrafino, que será de gran utilidad en cuestiones de seguridad, ya que el sistema podrá absorber una elevada energía de impacto ante un eventual accidente de tránsito (Weng, 2009). La distribución y el porcentaje de fases presentes, así como su naturaleza cristalográfica, son también parámetros fundamentales que juegan un rol importante sobre las propiedades del acero (Brandaleze et. al, 2017). Toda esta

información puede ser correlacionada con las variables de procesamiento, que son de gran utilidad para el medio industrial.

Desarrollo

El material empleado en esta investigación es el acero Dual Phase, DP-590, laminado en caliente. En la Tabla 1, se presenta la composición química del material seleccionado.

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Al	Nb	Ti
0,12	1,25	<0,01	<0,01	<0,12	0,02	0,03	0,06	<0,1	<0,01

Tabla 1: composición química del acero DP-590 (wt. %).

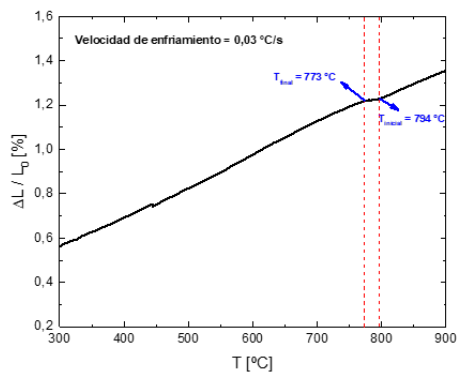
La técnica contemplada en este trabajo para el estudio de las transformaciones de fases en el estado sólido en el acero seleccionado es la dilatometría. Para tal fin, las muestras se dimensionan en forma de prisma rectangular, cuyas medidas son (5 x 5 x 50) mm y se calientan hasta 1150 °C, en atmósfera de aire. Posteriormente se las somete a diferentes perfiles térmicos, contemplando velocidades de enfriamiento entre 0,03 °C/s y 100 °C/s. En este caso se emplea un dilatómetro Theta Dilatronic II. A partir de los datos experimentales, se representa la deformación relativa de la muestra [$\Delta L/L_0$ (%)] vs la temperatura [T(°C)]. Dado que en el producto de acero ocurren las transformaciones de fase a medida que desciende la temperatura del sistema, una vez que el planchón sale del horno de precalentamiento, es necesario realizar y analizar dilatometrías en el enfriamiento. Esto permite obtener las temperaturas experimentales o puntos críticos, correspondientes a cada velocidad de enfriamiento contemplada.

La información se correlaciona con resultados de las temperaturas de transformación de fases obtenidas mediante ecuaciones empíricas para el acero en estudio (Ar_3 , Ar_1 , B_s , B_f , M_s y M_f), de acuerdo con (Krauss, 2005). Además, se integra con el estudio microestructural que permite identificar y cuantificar los microconstituyentes presentes, determinar el tamaño de grano y la microdureza para cada velocidad de enfriamiento (v_e) contemplada. En esta etapa del trabajo, solo se presentan parte de los resultados de la caracterización microestructural aplicando microscopía óptica realizada con un equipo OLYMPUS GX 51 (con analizador de imágenes Material Plus). No obstante, aplicando la norma IRAM-IAS U 500-122 y los reactivos metalográficos específicos, se determina el tamaño de grano de cada muestra ensayada mediante dilatometría. Además, se realizan mediciones de microdureza (Hv) mediante un microdurómetro LECO LMT300.

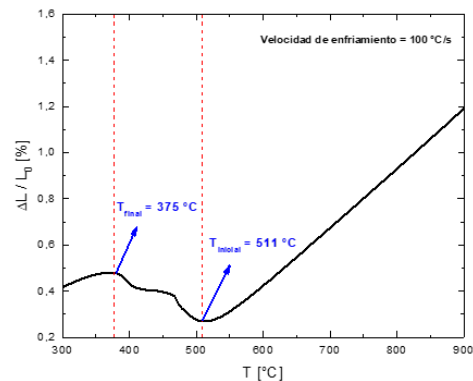
Resultados

Ensayos de dilatometría.

Los datos experimentales que se obtienen a partir de un dilatómetro permiten obtener las curvas de deformación relativa de la muestra $\Delta L/L_0$ (%) en función de la temperatura T (°C). Teniendo presente los cambios de pendiente que existen en cada una de las curvas dilatométricas, se pueden determinar las temperaturas de transformación de fases para cada velocidad de enfriamiento aplicada en cada ensayo, respectivamente. A modo de ejemplo, en las Figuras 1a y 1b se presentan los gráficos de deformación relativa para las velocidades de enfriamiento de 0,03 °C/s y de 100,00 °C/s, que corresponden con los enfriamientos más lento y acentuado considerados en este estudio.



(a) Curva de deformación relativa del acero DP-590, para una velocidad de enfriamiento de 0,03 °C/s.



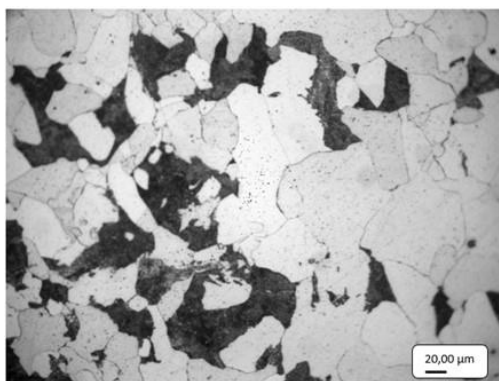
(b) Curva de deformación relativa del acero DP-590, para una velocidad de enfriamiento de 100,00 °C/s.

Figura 1: curvas de deformación relativa obtenidas para el acero DP-590 a las velocidades de enfriamiento menor y mayor alcanzadas en este estudio.

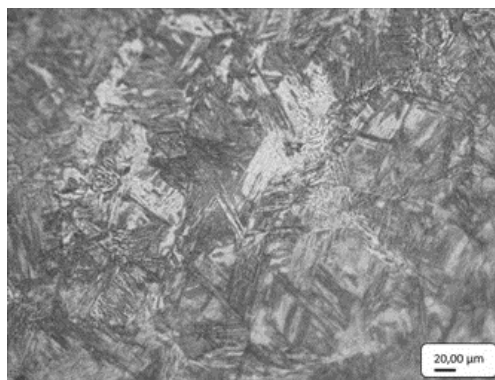
Para una $v_e = 0,03 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, se podrá notar que el sistema inicia su transformación de fases en el estado sólido para una $T_{\text{inicial}} = 794 \text{ } ^\circ\text{C}$, finalizando dicho proceso a $T_{\text{final}} = 773 \text{ } ^\circ\text{C}$. Sin embargo, para una $v_e = 100,00 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, el intervalo donde ocurre la transformación es diferente al caso anterior, pudiéndose comprobar que existe un corrimiento en las temperaturas, de modo tal que el inicio de la transformación ocurre para una $T_{\text{inicial}} = 511 \text{ } ^\circ\text{C}$ y finaliza a una $T_{\text{final}} = 375 \text{ } ^\circ\text{C}$. Estas temperaturas experimentales son las que se obtienen analizando, sobre cada enfriamiento, los cambios en la pendiente de la curva, obteniéndose de esta forma un par de puntos críticos (inicio y fin de transformación) para cada ensayo, respectivamente.

Estudio microestructural.

La velocidad de enfriamiento es una variable de gran importancia en el procesamiento industrial de la chapa automotriz, dado que promueve la formación de diferentes microestructuras en el acero, que confieren determinadas propiedades mecánicas finales al material. De esta manera, a través de la técnica de microscopía óptica, se pudo corroborar que a las bajas velocidades de enfriamiento contempladas en este estudio (entre $0,03 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ y $0,25 \text{ } ^\circ\text{C/s}$), se favorecen los fenómenos de difusión atómica, dado que se generaron microconstituyentes que son característicos para estos tipos de procesos. Por otra parte, a medida que se incrementa la velocidad de enfriamiento, hasta alcanzar la máxima de $100,00 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, los procesos de difusión atómica comienzan a ser más limitados, formándose en el sistema microconstituyentes característicos de los procesos sin difusión atómica, respectivamente.



(a) Microconstituyentes presentes en el acero DP-590 para una velocidad de enfriamiento de 0,03 °C/s.



(b) Microconstituyentes presentes en el acero DP-590 para una velocidad de enfriamiento de 100,00 °C/s.

Figura 2: Microconstituyentes presentes en el acero DP-590 para las velocidades menor y mayor alcanzadas en esta investigación.

En la Figura 2a, se observan los microconstituyentes estables en el acero DP-590 enfriado a una velocidad de $0,03 \text{ } ^\circ\text{C/s}$. La fase de color blanca es la solución sólida α o ferrita, mientras que la fase de color oscura representa la perlita, que es un agregado laminar de ferrita y cementita, respectivamente. Ambos microconstituyentes son el resultado de

los procesos de difusión atómica. Por otra parte, en la Figura 2b se observan los microconstituyentes estables en el acero DP-590 enfriado a una velocidad de 100,00 °C/s. A medida que se incrementa la velocidad de enfriamiento, se limitan los procesos difusivos, de modo tal que en el sistema se favorecen los procesos displacivos. En esta figura, el microconstituyente estable a la máxima velocidad de enfriamiento alcanzada en este estudio es la martensita, que corresponde a una estructura de átomos de carbono en hierro tetragonal.

Otra consecuencia del aumento en la rapidez de enfriamiento del acero es la disminución del tamaño de grano, que constituye otro de los parámetros relevantes en el procesamiento industrial de la chapa automotriz. En la Figura 3, se observa la evolución del tamaño de grano del acero DP-590 como función de la velocidad de enfriamiento, respectivamente.

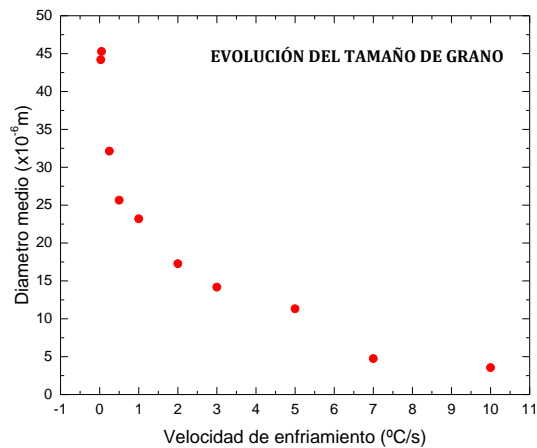


Figura 3: Evolución del tamaño de grano del acero DP-590 en función de la velocidad de enfriamiento.

Tal como se observa en la Figura 3, en el eje de las ordenadas se representa el tamaño de grano del acero expresado como diámetro medio, y en el eje de las abscisas se representa la velocidad de enfriamiento. A medida que se incrementa esta última, disminuye el tamaño de grano del sistema, pudiéndose corroborar de esta forma lo dicho con anterioridad a los procesos difusivos.

Microdureza Vickers

Hasta acá se podrá notar que las dos consecuencias directas de elevar la velocidad de enfriamiento del acero es la formación de microconstituyentes característicos de los procesos sin difusión atómica, así como también la disminución del tamaño de grano. Asociada a estas características, existe también un incremento en la resistencia mecánica del material, dado que las segundas fases que se forman a través de los procesos displacivos, como lo son las bainitas y las martensitas, elevan la resistencia mecánica del acero, respectivamente. Este comportamiento se puede observar en la Figura 4, a través de la medición de la microdureza Vickers sobre cada uno de los especímenes.

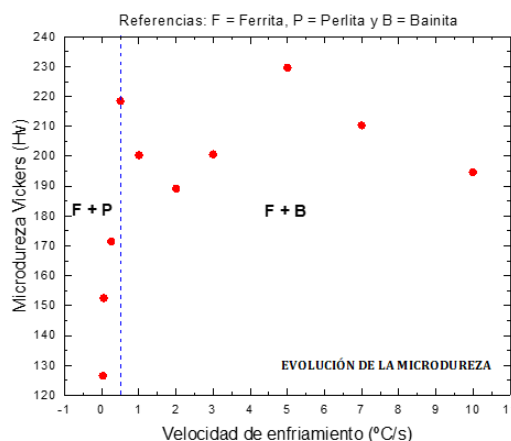


Figura 4: evolución de la microdureza como función de la velocidad de enfriamiento

Según se puede ver en la Figura 4, en el eje de las ordenadas se representa la microdureza Vickers, mientras que en el eje de las abscisas se representa la velocidad de enfriamiento. Asimismo, existe una línea punteada, paralela al eje de las ordenadas (microdureza Vickers), ubicada a 0,50 °C/s, que permite dividir el gráfico en dos campos de estabilidad: por debajo de 0,50 °C/s, las velocidades de enfriamiento permiten obtener en el sistema ferrita + perlita. Por encima de esta velocidad, se promueve la formación de ferrita + bainita, tal como se ha demostrado oportunamente con los estudios previos. En el rango de velocidades de enfriamiento contempladas para este estudio (0,03 °C/s a 100 °C/s), se genera en el material un incremento de microdureza del 55%. La información obtenida constituye un parámetro importante para el control del procesamiento a nivel industrial de producción de chapa automotriz.

Referencias

Brandaleze E., Ramírez M. E., Ávalos M. (2017). Microstructure Evolution at Different Cooling Rates of Low Carbon Microalloyed Steels. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 11, 22-29.

Fonstein N. (2015). *Advanced High Strength Sheet Steels: Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties*. Switzerland: Ed. Springer.

Krauss G. (2005). *Steels: Processing, Structure, and Performance*. USA: Ed: ASM International.

Sica D.E., Scarlan M. A., Rossini D. E., Beinstein J., Figueroa D. E. (2012). El futuro del sector automotriz en el mundo (2025): Fuerzas impulsoras y tecnologías clave para su desarrollo en el marco de políticas que promuevan la calidad de vida y la conservación del medio ambiente y de los recursos naturales. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación.

Weng Y. (2009). *Ultra-Fine Grained Steels*. Beijing: Ed. Springer.