

INCORPORACIÓN DEL FENÓMENO DE EVAPORACIÓN EN EL ENFRIAMIENTO DEL ACERO

Ortiz-Hernández, Milagros Gabriela (1); Minchaca-Mojica, Jesús Isaac (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [milagros_g_1109@outlook.com]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jminchaca@ugto.mx]

Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis de las boquillas de enfriamiento secundario del proceso de fabricación de planchones delgados de acero por colada continua, enfocándose en su impacto sobre la evolución térmica de la superficie que está siendo enfriada desde una temperatura inicial de 1200°C. Se hicieron consideraciones tales como: a) la velocidad, ángulos de impacto y tamaño de las gotas generadas por el tipo de boquilla Casterjet ½-5-60; b) selección de condiciones de operación industrial; c) la densidad de impacto de agua generada y el área de impacto, entre otras y se compararon con los datos generados por la boquilla Casterjet ½-6.5-90. Se resolvieron las ecuaciones fundamentales mediante un código de resolución numérica implementado en Matlab, lo que permitió calcular campos de temperatura para analizar la variación en toda la superficie del acero que está siendo producido, obteniendo resultados que muestran un enfriamiento heterogéneo para ciertas condiciones y que puede acercarse a un enfriamiento homogéneo en otras.

Abstract

In this work an analysis of the air-mist nozzles used in secondary cooling system of continuous casting compact strip process is carried out, focusing on their impact on the thermal evolution of the strand surface while diminishes its temperature from 1200°C (initial temperature). Considerations such as: a) droplet velocity, impact angles and size of droplets generated by a Casterjet ½-5-60 nozzle; b) operating conditions of industrial interest; c) water impact flux, among other were considered in this study and were compared with a Casterjet ½-6.5-90 nozzle. Fundamental equations were solved by an ad hoc developed numerical code in Matlab allowing to obtain temperature maps to analyze its variation over the strand surface that is being produced, obtaining results that show a heterogeneous cooling for some conditions that can become a homogeneous cooling by manipulating the operating conditions.

Palabras Clave

Atomización; Gota; Enfriamiento de acero; estocástico-determinístico; mapas de temperatura.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El proceso de colada continua de planchones delgados de acero CSP es un método utilizado para la producción de acero. Una vez que el acero líquido ha salido por la cuchara del horno donde ocurrió la transformación, deberá tomar formas funcionales que permitan la comercialización del producto. Para ello existen procesos de colada como lo son: colada en lingotera, colada en molde de arena y colada continua; siendo este último el encargado de obtener la mayor producción mundial actual. [1]

Dentro de este método existe un proceso de enfriamiento (durante la etapa de enfriamiento secundario) donde hay rocíos y nieblas de agua, generados por boquillas hidráulicas y neumáticas, respectivamente, que inicialmente impactan sobre una superficie seca que rápidamente evoluciona a un sistema en el cual las gotas que conforman los rocíos y nieblas impactan sobre una delgada película de líquido que formaron las gotas precedentes [3]. Dada la naturaleza física de este sistema, las películas de líquido que se forman sobre la superficie adquieren relevancia por su intervención directa en la transferencia de calor desde la misma superficie. La modelación de estas películas de líquido puede requerir de sub-modelos que realicen distintas consideraciones dependiendo de la aplicación; entre estas consideraciones están: (a) el momentum de las gotas que impactan sobre la película, (b) el espesor de la capa de líquido, (c) la fuerza de gravedad, (d) la tensión superficial, (e) las características de la superficie y, (f) en el caso de enfriamiento por rocíos, el cambio de fase. Estos fenómenos comúnmente deben ser simulados -considerando la existencia de cientos o miles de gotas- sobre escalas de longitud que son grandes en comparación con los diámetros de las gotas cuyos órdenes de magnitud son menores que el de la película de líquido que está siendo impactada.[2]

En el presente trabajo se desarrolló e implementó un método para el cálculo de la temperatura de una superficie de acero producido por colada continua mientras pasa por la zona de enfriamiento secundario, mediante la utilización de un código desarrollado en MATLAB para la generación de mapas de temperatura considerando ciertas condiciones como; ángulos de impacto y tamaño de las gotas generadas por el tipo de boquilla Casterjet ½-5-60; b) selección de condiciones de operación industrial; c) la densidad de impacto de agua generada y el área de impacto, entre otros parámetros hidrodinámicos del rocío. Los resultados se compararon con los datos generados mediante una boquilla Casterjet ½ -6.5-90 para encontrar la que proporcione un mejor desempeño de enfriamiento del acero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron en cuenta las ecuaciones de calor extraído Q_d Ec. (1), la cantidad de calor que está dado por el calor sensible Q_{sd} Ec. (2) y calor latente Q_{ld} Ec. (3) junto con las propiedades de los materiales como lo fueron el agua y acero, siendo éstas;

Propiedades del agua: $C_p = 4.1812 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$, $\rho = 998 \text{ Kg/m}^3$, $\alpha_f = 9.18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\lambda = 2260 \text{ KJ/Kg}$, Propiedades del acero: $C_p = 775 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $\rho = 7268 \text{ Kg/m}^3$ respectivamente.

$$Q_d = Q_{sd} + Q_{ld} \quad (1)$$

$$Q_{sd} = m_d C_p (T_{\text{ebullición}} - T_{\text{inicial}}) \quad (2)$$

$$Q_{ld} = m_d \lambda \quad (3)$$

Para llevar a cabo la determinación del calor sensible de la gota de agua, es necesario conocer su masa m_d Ec. (4) y volumen Ec. (5);

$$m_d = \rho_d V_d \quad (4)$$

$$V_d = (4/3) \pi r^3 \quad (5)$$

La generación de las gotas que impactan desde la boquilla hasta la superficie se realiza de manera estocástica, considerando las distribuciones experimentales, tomando en cuenta el área de dimensiones $A = 5.245 \cdot 10^{-3} \times 5.245 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ así como tres condiciones de operación industrial que resultan de interés:

1A ($p_a = 205$ kPa, $W = 0.42$ L/s), 3A ($p_a = 320$ kPa, $W = 0.42$ L/s) y 7A ($p_a = 205$ kPa, $W = 0.1$ L/s) y una altura (h) de 54mm (espesor del planchón delgado de acero). Con el valor de la densidad de impacto del agua (w) se determina el número de gotas que inciden sobre la superficie en un determinado instante de tiempo. En el presente trabajo se considera un tamaño de paso de tiempo; $\Delta t = 9E^{-7}$ s, gracias ello en conjunto con el A y w es posible calcular el volumen total de agua Ec. (6); [6]

$$w = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \quad (6)$$

Para obtener la temperatura final a la que se encontrará la superficie del acero se toma en cuenta la Ec. (7);

$$Q_{sac} = m_{ac} C_{pac} (T_{final} - T_{inicial}) \quad (7)$$

Con el software MATLAB se generó un código en el que se consideró que el área de la superficie del acero estaba representada por una malla de 100x100 celdas para lograr el desarrollo de mapas de temperaturas de una superficie de acero con una temperatura inicial de 1200°C hasta llegar a 1180°C, tomando en cuenta que la generación de gotas es estocástica así como los diámetros que estas contienen y los puntos de la superficie sobre los que impactan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo se utilizó el programa desarrollado que calcula y genera mapas de temperatura, los cuales se van mostrando a distintos intervalos de tiempo, generando un campo de gotas que impactan sobre la superficie a diferentes condiciones de operación.

En la Imagen 1 se muestran los campos de temperatura correspondientes a la condición 1A ($p_a = 205$ kPa, $W = 0.42$ L/s) en los cuales se aprecia que el enfriamiento es heterogéneo, solo se muestran algunos de los campos generados mientras la temperatura superficial descendía, y en todos se encontró un comportamiento similar de enfriamiento. En la Imagen 2 se calcularon los campos de temperatura donde se cambiaron las condiciones de operación, incrementando la presión y dejando el mismo flujo volumétrico que corresponde a la condición 3A ($p_a = 320$ kPa, $W = 0.42$ L/s). En esta imagen se aprecia un comportamiento más homogéneo en la temperatura superficial lo que se refleja en gradientes de temperatura que son menores comparados con los campos presentados en la Imagen 1. En la imagen 3 se muestran los campos generados bajo otra condición 7A ($p_a = 205$ kPa, $W = 0.1$ L/s) se mantiene la presión de la condición 1A y se cambia el flujo volumétrico, esta imagen muestra campos más heterogéneos similar al de la condición 1A pero con mayor cantidad de gotas impactadas en la superficie como lo muestra la 3A.

Un análisis adicional de los mapas generados muestra que la condición 3A produce mapas más homogéneos, es decir, que la generación de gradientes de temperatura es menor bajo esta condición. Un acero que es producido con un enfriamiento homogéneo ayuda a asegurar que la calidad del producto es mejor, favoreciendo la productividad de la planta. Además de que la condición 3A produce el enfriamiento más homogéneo, el tiempo en que disminuye la temperatura promedio de la superficie es el menor de las tres condiciones estudiadas. Lo anterior puede resultar aún más favorecedor para el proceso, pues además de tener un enfriamiento homogéneo éste se logra en un menor tiempo, lo que puede impactar directamente a la velocidad de producción de la máquina en la planta.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró el cálculo de la evolución térmica de la superficie del acero cuando se somete a diferentes condiciones de operación en el enfriamiento secundario. Se analizaron tres de estas condiciones y se encontró que el principal factor para tener un enfriamiento más homogéneo es el incremento en la presión de aire cuando esta sube de 205 kPa a 320 kPa; como segundo factor se encontró el flujo de agua dentro de la boquilla ya que cuando aumenta de 0.1 L/s a 0.42 L/s el enfriamiento también tiende a ser homogéneo pero en menor medida.

El análisis del desempeño entre distintas boquillas neumáticas se hizo al comparar los resultados del presente trabajo correspondientes a la condición 7A de la boquilla Casterjet $\frac{1}{2}$ -5-60 con los generados en un trabajo previo [7] para la boquilla Casterjet $\frac{1}{2}$ -6.5-90. El análisis reveló que para lograr el mismo descenso de 20 grados en la temperatura superficial promedio del acero, la boquilla 5-60 requirió de menos tiempo. Esto puede ser un indicio de la mayor eficiencia de ésta boquilla sobre la 6.5-90 y puede deberse al menor tamaño promedio Sauter de las gotas que genera (44 μm y 58 μm de diámetro con las boquillas 5-60 y 6.5-90, respectivamente). Este resultado permitirá profundizar sobre el estudio del desempeño térmico de las boquillas actualmente utilizadas en el enfriamiento secundario del acero.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor el Dr. Jesús Isaac Minchaca Mojica por su tiempo, orientación, pero principalmente por compartirme sus conocimientos y motivarme a participar en Veranos UG, a mi familia por ser una razón importante para seguir adelante, a mis padres y hermanos por siempre darme su apoyo.

REFERENCIAS

- [1] Sandro U. Cuellar López, Tesis de Licenciatura, Universidad de Guanajuato, 2017, México, 2017.
- [2] Jesús I. Minchaca Mojica, Agustín R. Uribe Ramírez, J. Arturo Alfaro Ayala, Martín Picón Núñez, "Modelación con dinámica de fluidos de las películas de líquido formadas en el enfriamiento de superficies calientes". Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Mayo 2014.
- [3] Jesús I. Minchaca Mojica, Agustín R. Uribe Ramírez, J. Arturo Alfaro Ayala, Martín Picón Núñez, "Simulación y estimación de los tiempos de formación de películas líquidas: efecto de las distribuciones de tamaño de las gotas". Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Cancún, Quintana Roo, México, Mayo 2015.
- [4] J.I. Minchaca M., Tesis de Doctorado, CINVESTAV-IPN, 2012, México, págs. 134-141.
- [5] J.I. Minchaca M., A.H. Castillejos E., F.A. Acosta G. and S. Murphy. "Fluid Dynamics of Thin Steel Slab Continuous Casting Secondary Cooling Zone Air Mists". In Proc of ILASS, 2010, Cincinnati, OH, USA.
- [6] J. I. Minchaca M., A. R. Uribe R., J. A. Alfaro A., and M. Picón N. "Formation Time of Liquid Films Generated by Water Sprays and Air-Mists with Numerical Simulations". In Proc of ILASS, 2014, Portland, OR, USA.
- [7] M.G. Ortiz-Hernandez, J.I. Minchaca-M. "Predicción de la Temperatura Superficial del Acero durante su Enfriamiento Bajo Condiciones de Interés Industrial". Jóvenes en la Ciencia. 2017. Vol. 3, No. 2, pp. 2552-2556.

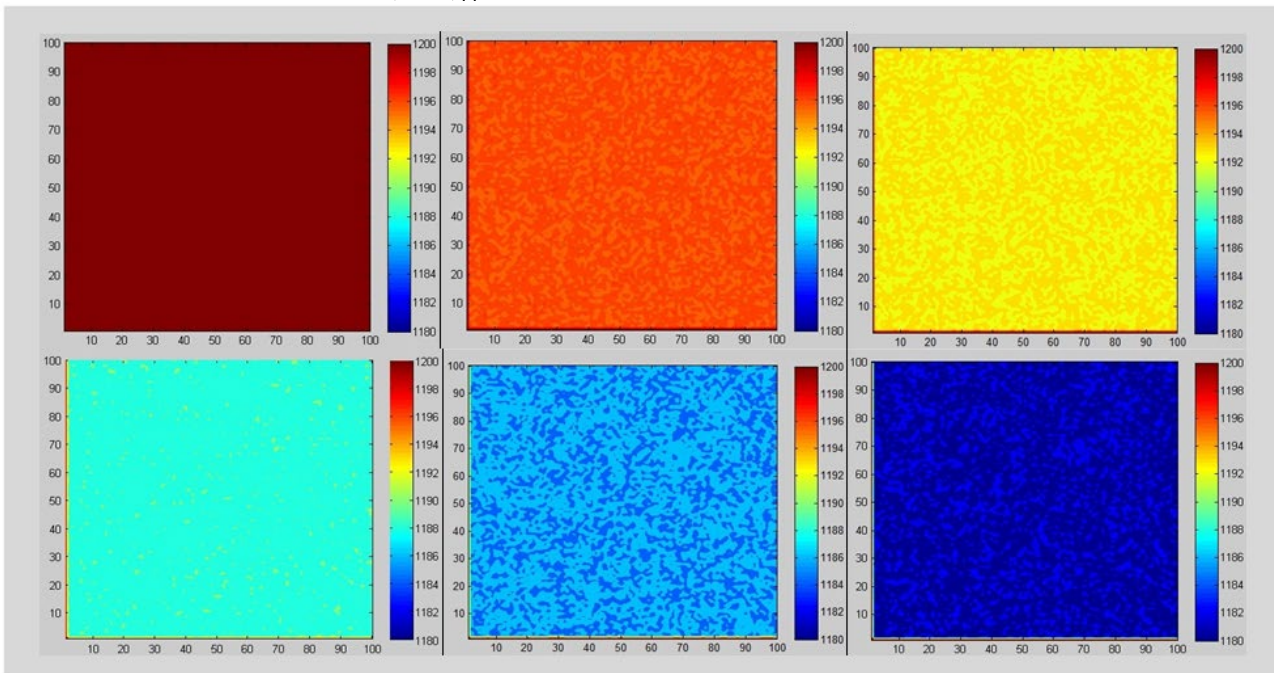


IMAGEN 1: Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 1A: $p_a = 205 \text{ kPa}$, $W = 0.42 \text{ L/s}$.

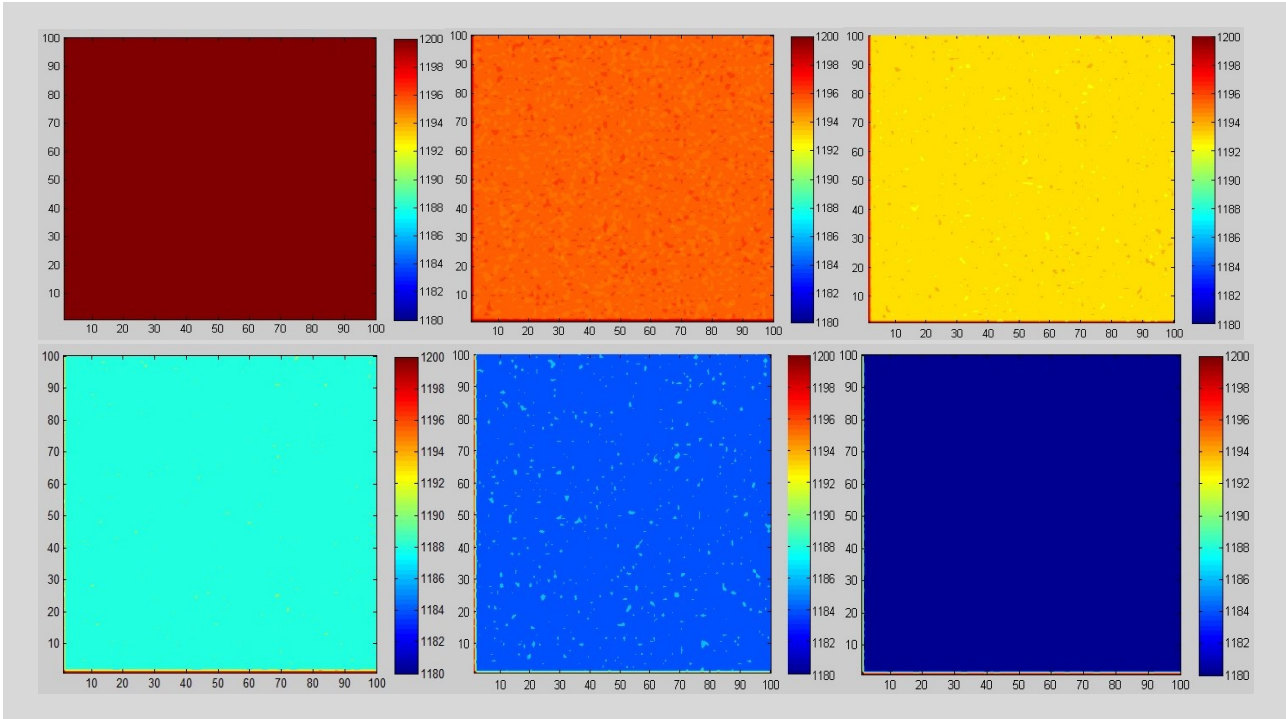


IMAGEN 2: Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 3A: $p_a = 320$ kPa, $W = 0.42$ L/s.

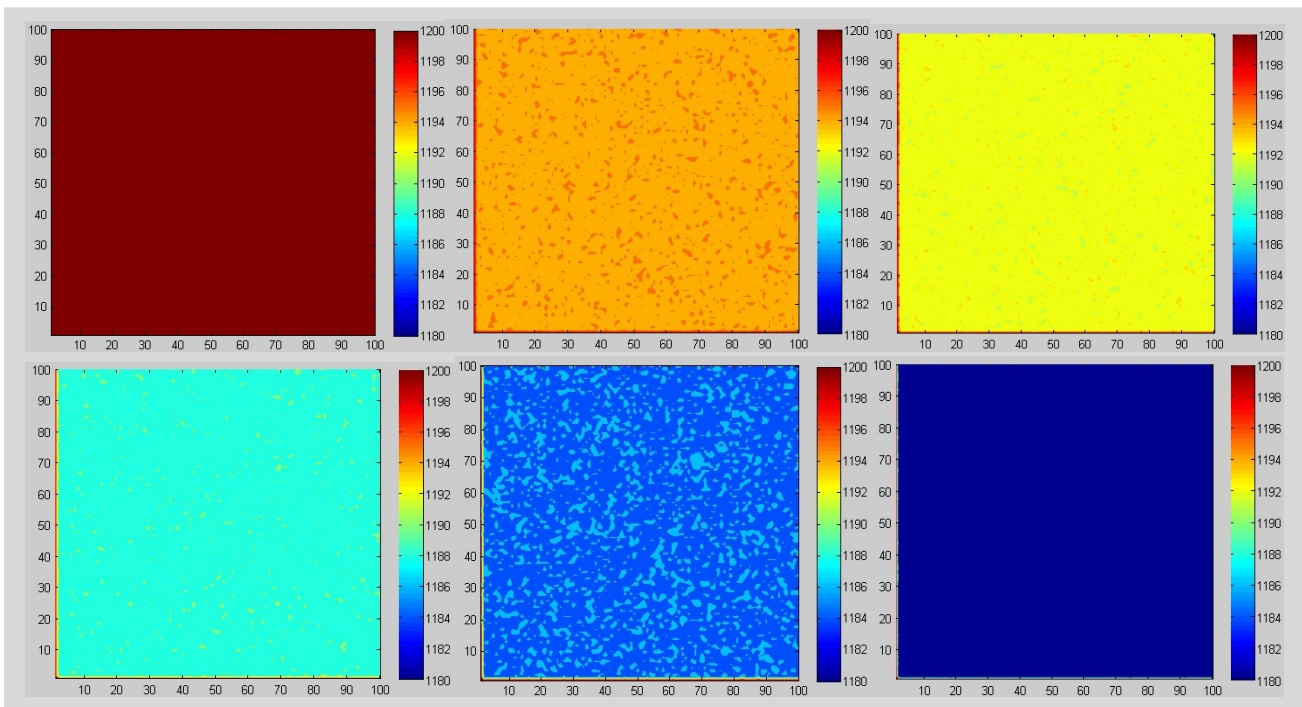


IMAGEN 3: Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 7A: $p_a = 205$ kPa, $W = 0.1$ L/s.