MODELIZACIÓN FEM Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE TEXTURA EN CHAPAS DE ACERO

Rubén Escribano García Alpha Pernía Espinoza Rubén Lostado Lorza Jesús Las Heras Casas Grupo EDMANS Grupo EDMANS Universidad de La Rioja. España. Javier Alfonso Cendón Universidad de León

Abstract

A product widely used in industry is painted steel sheet. For correct paint adhesion is necessary a particular texture is present in the sheet surface.

While the literature on the laminated sheet, especially steel, is very large, studies of texture transfer in sheets are used scarce and with a lot of simplifications. Therefore, a methodology that studies the influence of certain parameters in the transfer of texture in rolled sheet steel is presents in this paper.

The first phase of work involved the creation of finite element model (FEM) to reproduce the texture transfer in rolled sheet steel. For the development of this model, parameters have been considered such as thickness, roll diameter, friction coefficient, type of texture (draw), rollers deformation... The second stage has developed a predictive model, using data mining and artificial intelligence, to propose the optimization of the texture transfer process in steel sheets.

Keywords: finite element, FEM, predictive model, rolled, sheet, texture

Resumen

Un producto muy utilizado en la industria es la chapa de acero pintada. Para la correcta adhesión de la pintura es necesario que la chapa tenga una determinada textura en su superficie.

Mientras que la bibliografía sobre el laminado de chapa, especialmente de acero, es amplísima, los estudios de transferencia de textura en chapas son escasos y emplean bastantes simplificaciones. Por esto, en este trabajo se expone una metodología que estudia la influencia de ciertos parámetros en la transferencia de textura en chapas laminadas de acero.

La primera etapa del trabajo ha consistido en la creación de un modelo de elementos finitos (modelo FE) que reproduzca el proceso de transferencia de textura en chapas laminadas de acero. Para el desarrollo de este modelo, se han tenido en cuenta parámetros como espesor de la chapa, diámetro de los rodillos, coeficiente de rozamiento, tipo de textura (dibujo), deformación de los rodillos... En una segunda etapa se ha desarrollado un modelo predictivo, utilizando herramientas de minería de datos y de inteligencia artificial, para plantear la optimización del proceso de transferencia de textura en chapas de acero.

Palabras clave: elementos finitos, FEM, modelo predictivo, laminado, chapa, textura.

1. Introducción

La creciente exigencia de productos de mayor calidad en toda la industria, hace necesario un conocimiento en profundidad de los procesos de fabricación, y los productos de acero laminado en frío pintados no son una excepción.

La adhesión de la pintura a la chapa y la apariencia final del producto pintado están determinadas por la calidad superficial de la chapa. La rugosidad que presenta esta es dada en el Skin-Pass por transferencia de la textura presente en la superficie del rodillo a la chapa. En 1997, Deutscher publico un estudio con diversos métodos para generar rugosidades en los rodillos.

El Skin-Pass es el último paso en el proceso de laminado de chapas de acero, que consiste en una pasada ligera en frío para reducir ligeramente su espesor y aportar buen acabado dimensional y superficial. También, se busca modificar las propiedades mecánicas finales del producto eliminando la zona de fluencia.

Varios estudios experimentales se han realizado en los últimos años sobre la rugosidad de productos laminados en frío, como Gjønnes (1996), con un microscopio confocal láser de barrido, o Plouraboué y Boehm (1999), con un microscopio de fuerza atómica (AFM), estudiaron las superficies de aluminios. Posteriormente, en 2000, Ahmed y Sutcliffe estudiaron superficies de chapas de aluminio y de acero inoxidable laminadas en frío mediante interferometría tridimensional.

Un estudio más amplio fue realizado por Ma en 2002, donde estudio experimentalmente la influencia de la velocidad de giro de los rodillos, el porcentaje de reducción y el tipo de lubricación sobre la textura de chapas de acero laminas en frío. La toma de datos fue realizada con microscopio de fuerza atómica (AFM).

En 2008, Kijima y Bay estudiaron, con el método de los elementos finitos (FEM), la influencia de la rugosidad y de la presión de contacto en el grado de transferencia de textura. El modelo FE, realizado en 2D, consistía en una herramienta rígida que realizaba un desplazamiento vertical para transferir la rugosidad a la chapa. La rugosidad de la herramienta consistía en arcos de círculo de igual diámetro y con una separación constante.

En un artículo posterior, Kijima y Bay, compararon resultados FEM y experimentales en un proceso de transferencia de bandas transversales a chapas de acero. El modelo FEM consistía en una herramienta elástica que aplicaba cargas normales sobre una chapa elastoplastica de acero. Así, estudiaron la influencia de la presión y la lubricación en el grado de transferencia de estas bandas sobre la chapa.

2. Objetivos

El presente estudio tiene como primer objetivo construir un modelo de elementos finitos que reproduzca fielmente una serie de procesos Skin-Pass con transferencia de textura. Para ello, se propone un modelo FE en dos dimensiones, con rodillos elásticos y rugosidades generadas de forma aleatoria según una distribución normal. Estas características del modelo FE suponen un acercamiento más realista que estudios numéricos realizados anteriormente.

El segundo objetivo, consiste en hallar expresiones matemáticas que permitan determinar con facilidad y precisión los parámetros óptimos para la correcta ejecución del proceso de transferencia de textura. Para alcanzar esto objetivo se han generado modelos de predicción aplicando técnicas de minería de datos e inteligencia artificial

3. Metodología

3.1. Modelización de rugosidades

La rugosidad de una superficie es la medida de las variaciones micrométricas en la superficie de los productos manufacturados, las cuales le confieren aspereza.

En general, la rugosidad es un hecho no deseable que se produce inevitablemente durante los procesos de fabricación. En este caso, la rugosidad es un fenómeno deseable, ya que, la adherencia de la pintura sobre la chapa de acero depende de ella.

Figura 1: Rugosidad de una superficie



Los parámetros que definen la rugosidad de una superficie son los siguientes:

- Máxima altura, Rt: distancia máxima entre picos y valles,
- Valor medio, Ra:

$$Ra = \frac{1}{L} \cdot \int_{0}^{L} y \cdot dx$$
 (1)

• Número de picos por unidad de longitud, NP.

En este estudio, las rugosidades han sido modeladas mediante una serie de arcos de círculo, con sus centros dispuestos sobre una línea recta y cuyos radios pertenecen a una distribución normal:

Figura 2: Modelización de rugosidades



Con ayuda del programa estadístico R, se han generado ocho tipos de rugosidades considerando los parámetros de la Tabla 1. Estas rugosidades son las que presenta el rodillo '3' en su superficie exterior:

Figura 3: Rugosidad T08 sobre un círculo de radio 150 mm

		•	
Rugosidad	NP/cm	Rt (mm)	Ra (mm)
T01	50	5	0.5
T02	50	5	5
T03	50	20	0.5
T04	50	20	5
T05	100	5	0.5
T06	100	5	5
T07	100	20	0.5
T08	100	20	5

Tabla 1 Parámetros de las rugosidades

3.2. Modelo de elementos finitos

El modelo planteado es bidimensional (deformación plana), se considera una anchura unidad y los resultados obtenidos serán por unidad de anchura de chapa. El modelo se compone de dos rodillos elásticos, dos rodillos rígidos y una chapa elastoplástica, como se muestra en la Figura 4.

Los rodillos '1' y '2', de diámetro 100 mm, son rígidos para hacer el modelo menos pesado y más rápido. Esta simplificación es posible porque la zona de la chapa objeto de estudio no entra en contacto con estos rodillos. El objetivo de estos rodillos es curvar la chapa sobre el rodillo '3' para que esta aumente su estado tensional, y así, el marcado de textura sea más fácil.

El rodillo '3', de diámetro 90 mm, es elástico y su centro permanece fijo durante todo el análisis. El rodillo '4', de diámetro 300 mm, es elástico y su superficie presenta las rugosidades comentadas en el apartado 3.1. Inicialmente, este rodillo está en contacto con la chapa, después desciende aplastándola, y después realiza un giro que transfiere la textura a la chapa. El material de estos dos rodillos se considera perfectamente elástico con un módulo elástico de 210.000 MPa/mm, y un coeficiente de Poisson de 0.3.



Figura 4: Configuración inicial del modelo FE

La chapa, de 1 mm de espesor y 500 de longitud. Material de esta, que se considera elastoplástico, es un acero ZSTE-800 con un módulo elástico de 228.381 MPa/mm, un coeficiente de Poisson de 0.3, y un límite elástico de 1.017,6 MPa. La curva del ensayo a tracción de este acero se presenta en la Figura 5.





El modelo de fricción empleado está basado en las leyes de fricción de Coulomb. Abaqus 6.9-1 tiene implementado el modelo de fricción de Oden y Martins (1985), que tiene en cuenta la variación del coeficiente de fricción en función del ratio de deslizamiento entre las superficies de la chapa y las de los rodillos:

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \cdot e^{-\delta \cdot v}$$
⁽²⁾

Donde ' m_s ' es el coeficiente de fricción estático y ' m_k ' el dinámico; 'd' el coeficiente de decaimiento y 'v' la velocidad relativa entre las superficies.

Para la simulación de los contactos entre la chapa y los rodillos se utiliza la definición de 'Contacto General', disponible en ABAQUS/Explicit. Este tipo de contacto utiliza un tipo de formulación denominado 'Finite-Sliding', que permite la separación, el deslizamiento y la rotación entre superficies.

Se ha realizado un mallado fino para obtener la precisión necesaria únicamente en las zonas importantes del modelo, mientras que en el resto del modelo el mallado es más basto. De esta forma se obtiene un modelo poco pesado, rápido en su análisis y con gran precisión en la zona que va a ser estudiada.

Los rodillos elásticos han sido mallados de la misma forma, como puede ver en Figura 6.



Figura 6: Mallado de los rodillos

En la Figura 6 se puede ver que el interior está mallado con elementos grandes, mientras que la periferia y la zona central el mallado es más fino. Así, el rodillo '4' tiene 1.368 elementos tipo CPE3 y CPS4R, mientras que el rodillo '3' tiene de 6.740 a 6.890, dependiendo del tipo de rugosidad. Un ejemplo del mallado de la rugosidad puede verse en la Figura 7.



Figura 7: Mallado de la rugosidad del rodillo '3'

Toda la chapa ha sido mallada con elementos CPS4R de tamaño 0,33 mm, excepto en la zona donde va a recibir la rugosidad del rodillo '3'. En esta zona, los elementos son tipo CPS4R con un tamaño 0,02 mm y tipo CPE3 en la zona de transición.

Figura 8: Mallado de la parte central de la chapa



Con este mallado la chapa tiene 12.307 elementos tipo CPE3 y CPS4R, de los cuales 2.890 pertenecen a la zona de mallado fino y 2.797 a la zona de transición.

La aplicación de las condiciones de contorno se realiza en cuatro pasos. En el primer paso, llamado Precarga, se aplican dos cargas sobre la chapa: una tensión longitudinal, y una tensión de curvatura provocada por el giro de los rodillos rígidos.

Figura 9: Curvatura de la chapa



En el siguiente paso, llamado 'Descenso', el rodillo '3' desciende aplastando la chapa. El valor del descenso va a determinar, entre otros, el grado de transferencia de textura a la chapa.

En el tercer paso, llamado 'Movimiento', el rodillo '3' gira, arrastrando por fricción a la chapa y provocando el giro del rodillo '4'. Es en este paso donde se produce la transferencia de textura del rodillo '3' a la chapa.

El último paso, llamado 'Descarga', el rodillo '3' se detiene y asciende el mismo valor que descendió en el paso 'Descenso'. Esto se produce a la vez que los rodillos rígidos giran para volver a su posición inicial y que la tensión longitudinal cesa; es decir, cesan todas las cargas aplicadas sobre la chapa.

Al final de este proceso, se ha generado una rugosidad sobre la superficie superior de la chapa, como la que puede verse en la Figura 11.

3.3. Modelo paramétrico de elementos finitos

A fin de estudiar el grado de transferencia de textura, se han variado parámetros clave del modelo, estos son:

- Tipo de textura: definidos por Rt, Ra y el número de picos por centímetro, en total ocho texturas,
- Tensión longitudinal: 57,14, 142,85 y 200 MPa,
- Giro de los rodillos rígidos: 0, 12,7 y 24,9°,
- Descenso del rodillo '3': valores comprendidos entre 0,0185 y 0,1109.

De la combinación de estos valores se generan $8 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 216$ modelos. Con los resultados generados en el análisis de estos modelos se construye una base de datos. Posteriormente, está será usada para crear los modelos de predicción y para determinar la influencia de cada parámetro en la transferencia de textura.

4. Resultados

4.1. Resultados de los modelos de elementos finitos

La situación final de los modelos de elementos finitos es la siguiente:



Figura 10: Situación final en los modelos de elementos finitos

Y la zona de la chapa trabajada por el rodillo es:



Figura 11: Superficie de la chapa al final del análisis

Colocando la chapa de forma horizontal y tomando las coordenadas de los puntos de la superficie superior de la chapa se obtiene la Figura 12. En ella, la línea roja representa los puntos de la superficie de la chapa deformada, la línea negra es la superficie media final, y los círculos negros son los puntos de máxima y mínima cota.



Figura 12: Superficie marcada de la chapa con media, máximo y mínimo

En este gráfico se muestra el estado final de la superficie de la chapa y con el se calcula 'Ra' y 'Rt' de la chapa, pero no informa del grado de transferencia de textura conseguido. Este se calcula mediante un histograma comparativo como el de la Figura 13. Para construirlo, se han trazado 36 planos horizontales equidistantes entre sí sobre la chapa. Después, se han contado el número de puntos de la superficie de la chapa y del rodillo que se encuentran entre dos planos consecutivos. El eje X es el número de puntos que hay entre dos planos consecutivos, y el eje Y son las alturas de estos planos respecto a la superficie inferior de la chapa.

Con este histograma comparativo se puede determinar el grado de transferencia de textura. Este viene determinado por el error medio absoluto (MAE_error):

MAE_error =
$$\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{35} abs(h_{roll,i} - h_{sheet,i})$$
 (3)

Donde 'N' es el número de puntos de la superficie marcada en la chapa que coincide con el numero de puntos de la textura del rodillo, 35 es el número de barras en los histogramas y 'h_{roll,i}' y 'h_{sheet,i}' son las alturas de las barras de los histogramas.





La simetría/asimetría respecto al cero del eje X nos da una idea del grado de transferencia de textura. Si los dos histogramas fuesen totalmente simétricos entre sí, la transferencia de textura sería del 100% y el MAE_error sería cero. Por el contrario, si a la chapa no se le transfiere ninguna textura, el MAE_error sería máximo y todas las columnas de la chapa serían cero, excepto una que contendría todos los puntos de la chapa y correspondería al plano de altura 1, que es el espesor original de la chapa.

4.2. Modelos de predicción

Los modelos de predicción permiten calcular rápidamente y con precisión suficiente los parámetros que determinan la correcta transferencia de textura del rodillo a la chapa. Para construirlos se ha utilizado la herramienta Weka 3.6.1, desarrollada por la universidad de Waikato (Nueva Zelanda), y distribuida bajo licencia GNU.

En todos los modelos se utilizan los siguientes parámetros de entrada:

• NP: número de picos por centímetro en la textura del rodillo.

- Ra: distancia media, en milímetros, de la textura del rodillo a su superficie nominal.
- Rt: altura máxima, en milímetros, entre picos y valles de la textura del rodillo.
- D: el valor, en milímetros, que desciende el rodillo '3'.
- a: ángulo, en grados, de curvatura de la chapa.
- s: tensión longitudinal saliente, en MPa, aplicada en los extremos de la chapa.

Con estos parámetros conocidos, se presentan modelos capaces de predecir:

- Reduc: Reducción de espesor de la chapa, igual a 'Ra' de la chapa.
- Reac: Fuerza de reacción en el apoyo de los rodillos.
- Error: Error en la transferencia de textura.

El modelo obtenido para la reducción de espesor es un árbol M5P con nueve casos como mínimo en cada hoja. Este modelo obtiene un coeficiente de correlación de 0.9976 y un error medio absoluto de 0.0005.





Este tipo de árbol divide el espacio en ocho regiones y en cada una de ellas rige una ecuación lineal del tipo: Reduc = $-0.0531 \cdot \text{Ra} + 0.0323 \cdot \text{Rt} + 0.0539 \cdot \text{D} - 0.0011$

Aplicando el mismo modelo con los valores normalizados por variables, los pesos de las variables indican la importancia de las variables en la reducción de espesor. Las importancias obtenidas son: D (64,79%), Ra (9,91%), a (9,40%), s (9,06%), y Rt (6,84%).

El modelo predictor para la reacción en el apoyo del rodillo es un árbol M5P con dos ramas y siete casos como mínimo en cada hoja. Este modelo obtiene un coeficiente de correlación de 0,9994 y un error medio absoluto de 22,6148.



Figura 15: Árbol del modelo para la reacción en el apoyo del rodillo

Al igual que en el caso anterior, se aplica el mismo modelo con los valores normalizados para hallar la importancia de las variables en la reducción de espesor, estas son: D (78,49%), s (15,34%), Ra (4,02%), y Rt (2,14%).

El modelo para el error medio absoluto obtenido es un árbol M5P con doce hojas y ocho casos como mínimo en cada una. Este modelo obtiene un coeficiente de correlación de 0,9832 y un error medio absoluto de 0,014.



Figura 16: Árbol del modelo para el error medio absoluto

La importancia de las variables en la reducción de espesor son: D (39,89%), s (23,75%), a (18,17%), Rt (10,64%), Ra (6,78%), y NP (0,77%).

5. Conclusiones

En este estudio se ha descrito una metodología para determinar modelos matemáticos capaces de predecir el resultado de un proceso Skin-Pass con transferencia de textura, usando herramientas elementos finitos y de minería de datos. Con estos modelos predictivos es posible ajustar en tiempo real y con mayor precisión los parámetros del Skin-Pass que determinan la correcta transferencia de textura, reduciendo tiempos de ajuste del operario, tiempos perdidos de máquina y pérdidas de material.

Primero, se ha construido un modelo de elementos finitos y, a partir de este, se han generado varios modelos FE variando parámetros significativos para crear una base de datos de diversos procesos Skin-Pass con transferencia de textura.

Después, se han procesado los datos y se han generado una serie de figuras e histogramas con los que es posible obtener información de un amplio rango de procesos Skin-Pass con

transferencia de textura. Además, se ha creado un parámetro, llamado MAE_error, que determina el grado de transferencia de textura para cada uno de los modelos FE. Tomando la base de datos, junto con el parámetro MAE_error, se han entrenado varios modelos de predicción para cada variable de salida y se han testeado por validación cruzada.

Finalmente, se puede afirmar que los modelos de predicción basados en simulaciones FE proporcionan una herramienta muy útil para el cálculo de procesos de transferencia de textura en el proceso Skin-Pass.

6. Referencias

- Ahmed, R., & Sutcliffe, M.P.F. (2000). Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear*, 244, 60-70.
- O. Deutscher (1997). Methods for attaining particular roughness on cold rolled strip. *Iron and Steel Engineer*.
- jønnes, L. (1996). Quantitative characterisation of the surface topography of rolled sheets by laser scanning microscopy and Fourier transformation. *Metallurgical and Materials Transactions*, *27*, 2338-2346.
- Le, H.R., & Sutcliffe, M.P.F. (2000). Analysis of surface roughness of cold-rolled aluminium foil. *Wear*, 244, 71-78.
- Kijima, H., & Bay, N. (2008). Skin-Pass rolling I-Studies on roughness transfer and elongation under pure normal loading. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, *48*, 1313-1317.
- Kijima, H., & Bay, N. (2008). Skin-Pass rolling II-Studies on roughness transfer and elongation under combined normal and tangential loading. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, *48*, 1313-1317.
- Kijima, H., & Bay, N. (2009). Influence of tool roughness and lubrication on contact conditions in Skin-Pass rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4835-4841.
- Ma, B., Tieu, A.K., Lu, C., & Jiang, Z. (2002). An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 657–663.
- Martins, J.A.C., & Oden, J.T. (1987). Existence and uniqueness results for dynamic contact problems with nonlinear normal and friction interface laws. *Non-linear Analysis*, *11*, 407-428.
- Plouraboué, F., & Boehm, M. (1999). Multi-scale roughness transfer in cold metal rolling. *Tribology International*, *32*, 45-47.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Rubén Escribano García

Phone: +34 941 299 517

Fax: + 34 941 299 794

E-mail: ruben.escribano@alum.unirioja.es

URL: http://www.mineriadatos.com