

Evaluación numérica del proceso de granallado y determinación del campo de esfuerzos residuales por medio del método de respuesta de grieta

Guillermo Urriolagoitia-Sosa · Guillermo Urriolagoitia-Calderón ·
Luis Héctor Hernández · Beatriz Romero-Ángeles ·
Carlos Torres-Torres · Rafael Rodríguez

Recibido: Marzo 2010, Aceptado: Abril 2010

©Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España 2010

Resumen En la literatura mundial, se encuentran muy bien establecidos los beneficios que presenta el proceso de granallado. Sin embargo, este proceso es una tarea de desarrollo artesanal (en algunos de los casos) o dependiente de la experiencia del operario. Una de las principales virtudes de este proceso, es el fortalecimiento de la superficie y la elevación del esfuerzo de cedencia del material. Este incremento de la resistencia en el material, se debe a la inducción de un campo de esfuerzos residuales de tipo compresivo. La inducción de este tipo de campo de esfuerzos residuales es en extremo benéfico para el componente, ya que esta operación hace que los elementos sometidos a cargas cíclicas eleven su capacidad de resistencia a la fatiga en la superficie (propagación de la grieta) y puedan de esta manera tener una vida útil más larga, por otra parte, que las cargas aplicadas a estos elementos se puedan elevar considerablemente. En este artículo, se realiza una comparación de la obtención del campo de esfuerzos residuales inducido por el granallado, realizado por dos medios, el analítico y por el Método del Elemento Finito (MEF), esto con el fin de obtener un método de determinación de esfuerzos residuales por medio del MEF, que se acerque en mayor medida a los registrados por la parte experimental. El análisis numérico que en

este trabajo se presenta; se realizó en 2D, considerando condiciones cuasi-estáticas y no tomando en cuenta el disparo aleatorio del proceso de granallado. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos en el efecto que produce el cambio de tamaño de bola. De esta manera, en posteriores análisis, se podrá realizar una evaluación de los mejores resultados obtenidos por medio del MEF variando determinados factores que arrojen las condiciones idóneas de los parámetros en la prueba experimental, reduciendo costo y tiempo.

NUMERICAL EVALUATION OF THE SHOT PEENING PROCESS AND DETERMINATION OF RESIDUAL STRESS FIELDS BY THE CRACK COMPLIANCE METHOD

Summary In the open literature around the world, it has been very well established the benefits that produces the shot peening process. Nevertheless, this process is a task, in some of the cases, of the development of handcrafted and / or dependent on the experience of the workman. One of the principal virtues of this process, is the strengthening of the surface and increase in the yield stress of the material. This strengthening or increase of the resistance in the material, owes to the induction of a residual stress field of compressive type. The induction of this type of effect is extremely beneficial for the component, since this operation does that the elements submitted to cyclical loads raise its fatigue resistance (crack propagation) on the surface and could have hereby a longer useful life, and in the other hand, the applied loads to these elements could raise considerably. In this article, it is presented a comparison of the obtained residual stress field by shot peening by two

Guillermo Urriolagoitia-Sosa · Guillermo Urriolagoitia-Calderón ·
Luis Héctor Hernández · Beatriz Romero · Carlos Torres · Rafael
Rodríguez
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos" Zacatenco
Col. Lindavista, C.P. 07738, México D. F., México
e-mail: guiurri@hotmail.com, urrio332@hotmail.com,
luishector56@hotmail.com, romerobeatriz97@hotmail.com,
crstorres@yahoo.com.mx, rrodriguezmn@ipn.mx

methods, by the analytical and the finite element method (FEM), in order to obtain a confinable method for the evaluation of residual stresses, which approaches in major measurement to the registered ones by the experimental procedure. The numerical analysis performed in this work, it was done by 2D simulation, considering quasi-static conditions and not accounting random shot in the shot peening process. Also it is present the results obtained in the effect that the ball size produced. Hereby, in a later analyses, it will be possible to do an evaluation of the best results obtained by means of the FEM, changing certain factors that throw the suitable conditions of the parameters in the experimental tests, reducing cost and time.

1. Introducción

El proceso de granallado, que es considerado como una técnica mecánica, se aplica ampliamente alrededor del mundo, sin embargo, en México no tiene gran desarrollo y es poco utilizado. Aparentemente, la escasa utilización de este proceso es debido a la insuficiente difusión que se le ha otorgado, lo cual impide mostrar adecuadamente sus extraordinarios beneficios.

Los tratamientos térmicos y químicos son los más aceptados y utilizados en México. Mediante la aplicación de este tipo de métodos es posible incrementar la dureza superficial de los componentes, lo cual permite un menor desgaste y prolongar la vida útil del material. Sin embargo, el proceso de granallado también ayuda en el incremento de la dureza, pero además, contribuye con otros beneficios, como; incrementar el esfuerzo a la cedencia, aumentar la resistencia a la corrosión y facilitar la adherencia de ciertos recubrimientos sobre la superficie del componente [1-4]. El proceso de granallado es un tratamiento superficial que consiste en trabajar en frío al material. La técnica está basada en la impacción directa de una corriente de proyectiles de forma esférica (o en su defecto sin vértices) (Figura 1) [5]. Esta acción es equivalente a ejercer en la pieza un trabajo de pequeños martilleos sobre la superficie, ocasionando un flujo plástico localizado. Después de aplicar el tratamiento mecánico, la superficie queda inducida con un campo de esfuerzos residuales compresivo, el cual es extremadamente benéfico para evitar la falla por fatiga [6].

En este artículo, se presenta la simulación del proceso de granallado por medio del Método del Elemento Finito (MEF). Esto con el fin de darle mayor difusión al método de granallado y proporcionarle una mayor confiabilidad en sus efectos benéficos. Además, este tipo de análisis pretende ayudar y facilitar la aplicación del proceso de granallado por medio de un estudio de

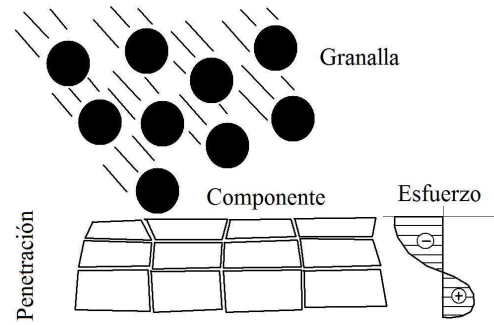


Figura 1. Representación gráfica del proceso de granallado

ciertos importantes factores que intervienen. De esta manera, en posteriores investigaciones, se podrá realizar una evaluación de los mejores resultados obtenidos por medio del MEF variando determinados factores que determinen las condiciones idóneas de los parámetros para la prueba experimental, como; velocidad de disparo, diámetro adecuado de la granalla, zona de alcance, penetración, rugosidad producida, etc. Lo cual generará una reducción en costo y tiempo. Asimismo, por medio de la aplicación de este tipo de proceso, es posible ayudar al desarrollo de la industria metal mecánica del país.

2. Teoría de método de respuesta de grieta

En el año de 1971, *Vaidyanatha* y *Finnie* propusieron el enfoque del Método de Respuesta de Grieta [7]. Este nuevo método se basa en la Mecánica de la Fractura [8]. Al introducir en un componente que posee historia previa (esfuerzos residuales) una grieta, ciertos esfuerzos son liberados, cambiando la distribución general. Lo anterior ocasiona una variación en la distribución de los mismos, reacomodando los esfuerzos remanentes del componente. Este fenómeno ocurre por cada incremento de grieta. Dicho reacomodo es superpuesto cada vez que se presenta un cambio de grieta [9]. Puede determinarse la distribución de los esfuerzos residuales desconocida, utilizando la *solución de avance* para cada incremento de profundidad secuencial, representado como una serie de polinomio

$$\sigma_y(x) = \sum_{i=0}^n A_i P_i(x) \quad (1)$$

donde A_i son los coeficientes a obtener y P_i es una serie, $x^0, x^1, x^2, \dots, x^n$ etc., polinomios de *Legendre* u otras funciones. Pero antes que los valores de A_i puedan ser determinados, es necesario obtener la función $C_i(a, s)$ del CCM. Lo cual se realiza por medio de la deformación

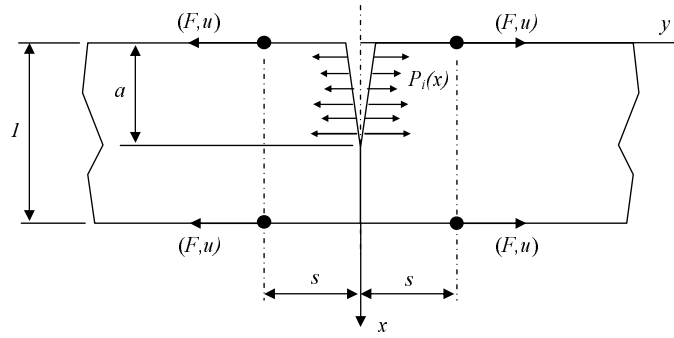


Figura 2. Superficie de la grieta [8]

unitaria ocasionada por el corte en la posición s cuando la distribución de esfuerzos $P_i(x)$ es aplicada a la longitud de la grieta a_j . $C_i(a, s)$ es determinada de acuerdo a procedimientos fundamentados por la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica [8].

En la Figura 2 se muestra el funcionamiento del Método de Respuesta de Grieta para una tira (2D, con espesor unitario), con una grieta en el borde de longitud a (Figura 2). Para obtener el desplazamiento horizontal u y (l, s) se introduce un par de fuerzas virtuales F . Estas fuerzas pueden localizarse en la superficie libre o bajo ésta. El cambio de energía de esfuerzo debido a la presencia de la grieta y de la fuerza virtual se presenta por [10]:

$$U = \frac{1}{E'} \int_0^a (K_I + K_{IF})^2 da \quad (2)$$

Aplicando el teorema de *Castigliano* [11], el desplazamiento $u(a, s)$ puede ser determinado tomando la derivada de la energía del esfuerzo con respecto a la fuerza virtual [8]

$$u(a, s) = \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial F} \Big|_{F=0} = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I \frac{\partial K_{IF}(a, s)}{\partial F} da \Big|_{F=0} \quad (3)$$

Diferenciando ahora con respecto a la distancia s , el esfuerzo en la dirección x es [8]:

$$\varepsilon(a_j, s) = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I(a) \frac{\partial^2 K_{IF}(a, s)}{\partial F \partial s} da \quad (4a)$$

La deformación unitaria $\varepsilon(a, s)$ debida al esfuerzo $P_i(x)$ se conoce como la función del Método de Respuesta de Grieta $C_i(a, s)$ y se representa como:

$$C_i(a_j, s) = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I(a) \frac{\partial^2 K_{IF}(a, s)}{\partial F \partial s} da \quad (4b)$$

Debido a la linealidad de K_{IF} con F , el segundo término bajo la integral en la ec.(4b), es el mismo $Z(a)$ que en $Z(a) = \frac{B}{F} \left(\frac{\partial K_{IF}}{\partial s} \Big|_{s=0} \right)$. Con $B = 1$. En consecuencia la ec.(4b) se puede indicar como:

$$C_i(a_j, s) = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I(a) Z(a) da \quad (4c)$$

Una vez determinadas las soluciones $C_i(a, s)$ se calculan las deformaciones unitarias que se esperan y que están directamente relacionados con las variables expresadas en la ec.(1), como:

$$\varepsilon(a_j, s) = \sum_{i=0}^n A_i C_i(a_j, s) \quad (5)$$

Los términos desconocidos A_i , se establecen a partir de la ec.(5) y considerando que los esfuerzos deben coincidir con la medición experimental que se efectúa durante el corte. Para minimizar el promedio de error, se puede utilizar sobre todos los puntos de datos, la aproximación por el método de mínimos cuadrados. El mínimo cuadrado de la solución es obtenida al minimizar el cuadrado de error relativo de la constante desconocida A_i , y se puede indicar como [7]:

$$\frac{\partial}{\partial A_i} \sum_{j=1}^m \left[\varepsilon(a_j, s) - \sum_{k=0}^n A_k C_k(a_j, s) \right]^2 = 0 \quad (6a)$$

$$i = 0, \dots, n$$

de aquí que los coeficientes A_i se determinan como [9]:

$$\{A\} = \left([C]^T [C] \right)^{-1} [C]^T \{\varepsilon_{medida}\} \quad (6b)$$

Una vez que estos son determinados, la distribución de esfuerzos residuales puede ser establecida mediante la ec.(1). Es importante observar que se puede utilizar el procedimiento descrito anteriormente cuando el gradiente de la distribución del esfuerzo residual no es muy severo.

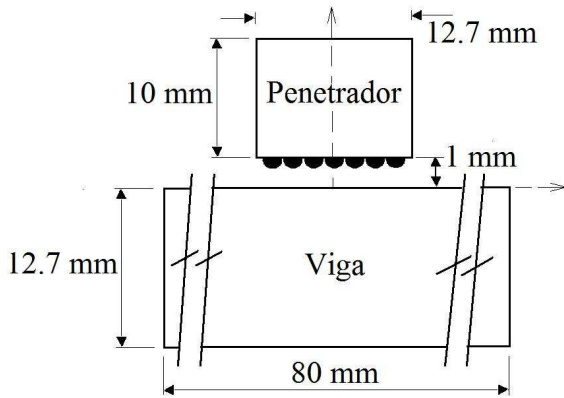


Figura 3. Dimensiones de la viga y penetrador

3. Procedimiento numérico

El objetivo principal de esta investigación, es cuantificar el campo de esfuerzos residuales que se genera en una superficie sometida al proceso de granallado y la diferencia en el efecto que producirá el cambio en el diámetro de bola. El análisis se realizará con un paquete comercial y en el plano. Las dimensiones del espécimen (viga) son 80 mm de largo y 12.7 mm de alto y la probeta de penetración de 12.8 mm de base y 10 mm de altura (Figura 3). La probeta de penetración sólo contará con propiedades elásticas, las cuales son idénticas a la viga. Las propiedades de la viga son elasto-plásticas y se simulan de manera bilineal, con; módulo de Young $E = 200000 \text{ N/mm}^2$, esfuerzo de cedencia $\sigma_y = 622 \text{ N/mm}^2$, esfuerzo último $\sigma_U = 914,9 \text{ N/mm}^2$ y relación de Poisson $\nu = 0,3$.

Para simular el comportamiento elasto-plástico del material, se utilizó un modelo general, que consiste de una regla de endurecimiento cinemático con componentes isotrópicos de endurecimiento (ecs.(7) y (8), respectivamente) [12]

$$da = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) d\epsilon^{pl} - \gamma \alpha d\epsilon^{pl} \quad (7)$$

$$\sigma_0 = \sigma|_0 + Q_\infty (1 - e^{-\epsilon^{pl} b}) \quad (8)$$

donde ϵ^{pl} es la deformación unitaria plástica equivalente, α es el esfuerzo en la superficie inferior (back-stress), C es el módulo inicial cinemático, γ es el rango en el cual el módulo cinemático decrece con respecto a la deformación plástica, σ_0 es el esfuerzo actual de cedencia, $\sigma|_0$ es el esfuerzo original de cedencia, Q_∞ es el máximo cambio en el tamaño de la superficie de cedencia y b define el rango en el cual la superficie de cedencia cambia con relación al desarrollo de la deformación unitaria plástica. La ec.(7), describe la translación de la superficie de cedencia en el espacio del esfuerzo debido al esfuerzo de superficie inferior (back-stress), mientras

que la ec.(8), describe el cambio del esfuerzo equivalente definiendo el tamaño de la superficie de cedencia [13].

Se realizó un análisis estructural y se utilizó un elemento de trabajo de ocho nodos. La simulación se desarrollará por medio de dos sólidos (uno penetrando a la viga) y utilizando condiciones de contacto. El modelo que se realizó, fue preparado para posteriormente ser capaz de evaluar numéricamente el método de respuesta de grieta (CCM). En este sentido, la malla de la viga se hizo de manera controlada con elementos de 1 mm de altura (menos la base que tiene una altura de 0.7 mm) y se tuvo cuidado para que los elementos en la parte central de la viga tuvieran un ancho de 0.5 mm (Figura 4). De esta manera se podrá simular una muesca de 1 mm por 1 mm y relajar el campo de esfuerzos residuales y utilizar el CCM.

Se introducen las condiciones de frontera en la base de la viga, restringiendo el desplazamiento en y . La inducción del campo de esfuerzos residuales se realizó por medio de penetración, el cual penetró a la viga con una profundidad de 0.2 mm. Esta penetración fue establecida por una reducción de la altura de la viga de 0.2 mm. La inducción del campo de esfuerzos residuales quedará terminada al retraer el penetrador a su posición inicial, dejando que la viga recobre parcialmente su elasticidad y registrando el campo de esfuerzos residuales obtenidos. Posteriormente, se realiza la simulación y evaluación del CCM, donde es necesario simular la introducción de muesca de 1 mm de largo sucesiva y después de cada corte se registra el resultado de la deformación unitaria en x en el nodo final al término de la grieta (Figura 4).

4. Resultados de los casos de estudio [6]

El análisis numérico que se presenta, fue diseñado para determinar el efecto en la inducción del campo de esfuerzos residuales con respecto al tamaño de bola en el proceso de granallado. Se simularon tres diferentes tamaños de bola, los cuales fueron determinados con respecto a la ASM [14]. La granalla en el sólido de penetración quedó con las siguientes dimensiones; pequeño S-110 ($\phi = 0.3 \text{ mm}$) mediano S-230 ($\phi = 0.6 \text{ mm}$) y grande S-330 ($\phi = 0.84 \text{ mm}$). En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos sobre la inducción del campo de esfuerzos residuales en el material.

5. Evaluación numérica del CCM

A continuación se realizó la determinación del campo de esfuerzos residuales en cada uno de los casos de estudio por medio del CCM. En la Figura 6 se muestra la comparación entre estos dos métodos para todos los casos de estudio.

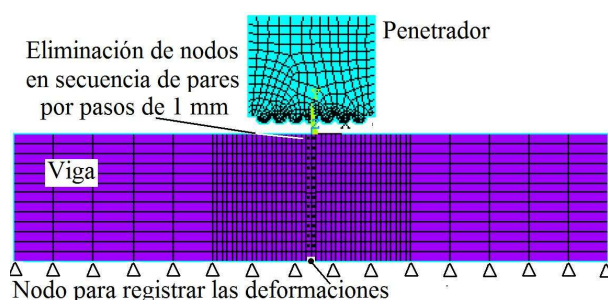


Figura 4. Mallado del modelo

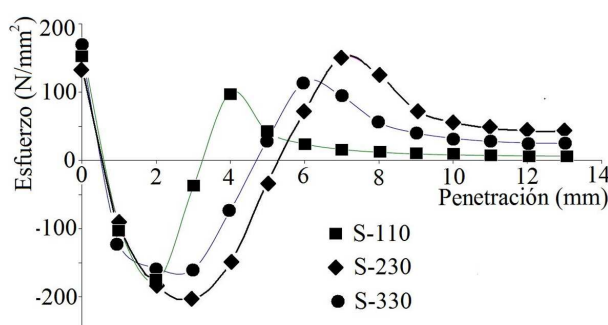


Figura 5. Esfuerzos residuales en la viga dependiendo del tamaño de granalla

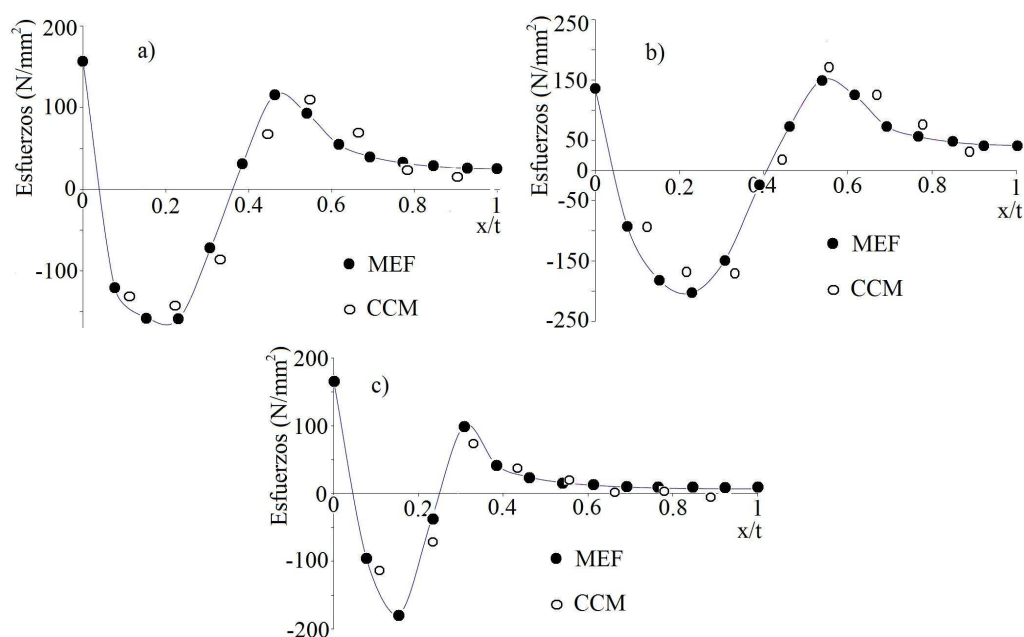


Figura 6. Comparación de resultados entre MEF y CCM. a) Granalla S-330. b) Granalla S-230. c) Granalla S-110

6. Conclusiones

En este trabajo se determinó una nueva metodología numérica para simular el proceso de granallado e inducir un campo de esfuerzos residuales. Este tipo de procedimientos no es nuevo, ya que en el pasado se había realizado por medio de la penetración de una pequeña bola en un espécimen. Sin embargo en este trabajo se

presenta la penetración de un bloque con 7 bolas en su base. Por medio de este procedimiento se pretende simular el efecto de un conjunto de bolas en la superficie y no sólo un impacto sencillo.

También se puede ver en las Figuras 5 y 6 el efecto del tamaño de la granalla en la inducción del campo de esfuerzos residuales. En este sentido la granalla media (S-230) es la que produce una mayor penetración en el

espécimen y un campo de esfuerzos residuales mayor. Es muy importante mencionar que las condiciones en el análisis fueron constantes en los tres casos, la única variable fue el cambio en la dimensión de la granalla. El que la granalla media haya producido el mayor campo de esfuerzos residuales, fue una sorpresa, ya que se esperaba que la granalla mayor lo hiciera. Esto se puede deber a la separación entre granalla debido a su tamaño y es probable que esto favorezca la producción una mayor plasticidad localizada.

Asimismo, este trabajo sirvió como base para evaluar el Método de Respuesta de Grieta. El CCM tiene una gran importancia en la determinación de campo de esfuerzos residuales, sin embargo no se sabe de su aplicación en superficies con deterioro, como es el caso de componentes bajo el proceso de granallado. Los resultados que se muestran en la Figura 6, son bastante alentadores, ya que se puede observar una gran similitud. Conjuntamente, el análisis numérico presenta algunas situaciones de aplicación que podrían ser útiles para implementar de manera experimental al CCM, como por ejemplo la sujeción del espécimen. En el análisis numérico se puede ver gráficamente cómo el espécimen tendrá a relajarse al introducirse el corte, lo cual puede ser aprovechado en la experimentación.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte de recursos financieros y equipo al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología y al Instituto Politécnico Nacional para la realización de esta investigación.

Referencias

1. Champaigne J. (1986) *Controlled shot peening*. Electronics Incorporated. pp. 1:15
2. Champaigne J. (2001) *The little book on shot peening*. Electronics Incorporated. pp. 1-6
3. Fuchs H.O. (1959) Techniques of surface stressing to avoid fatigue. *Metal Fatigue*. McGraw Hill. pp. 197-229
4. Heaton R.B. (1989) Shot peening. *Metal Finishing*. pp. 25-31
5. Zaldivar-Gonzalez E. (2008) Efecto del tamaño de bola en el proceso de granallado. Tesis Maestría en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional. SEPI. ESIME Zacaten-co. pp. 2-3
6. Urriolagoitia-Sosa G., Zaldivar-Gonzalez E., Sandoval-Pineda J.M., Garcia-Lira J. (2009) Assessment of the crack compliance method and the induction of residual stresses by shot peening using finite element method. *Applied Mechanics and Materials*. 15:109-114
7. Vaidyanatha N.S., Finnie I. (1971) Determination of residual stresses from stress intensity factor measurements. *Journal Basic Engineering*. 93:242-246
8. Cheng W., Finnie I. (1994) An overview of the crack compliance method for residual stress measurement. *Proc. 4th Int. Conf. Residual Stress*. Baltimore. Maryland. Society for Experimental Mechanics. p. 449-458
9. Prime M.B. (1999) Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method. *Applied Mechanics Reviews*. 52(2):75-96
10. Cheng W., Prime M.B., Finnie I. (1997) Measurements of residual stresses through the thickness of a strip using the crack compliance method. *Residual Stress III – Science and Technology. Proceedings 3rd International Conference of Residual Stress*. 2:1127-1132
11. Todd J.D. (1981) *Structural theory and Analysis*. Second Edition. Macmillan Publisher Ltd. pp. 181-189
12. Urriolagoitia-Sosa G. (2005) Analysis of prior strain history effect on mechanical properties and residual stress in beams. PhD thesis. Oxford. Brookes University
13. Urriolagoitia-Sosa G., Durodola J.F., Fellows N.A. (2003) Determination of residual stress in beams under Bauschinger effect using surface strain measurements. *Strain*. 39(4):177-185
14. (1991) *Surface Engineering*. Vol. 5. ASM Handbook. Edited by ASM International. USA