

ESQUEMA DE ANÁLISIS Y CÁLCULO DE UNIONES REMACHADAS POR EMBUTIDO

Dr. Frank Hernández González, Dr. Rafael Goytisoló Espinosa,
Dr. Juan José Cabello Eras
Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos,
Carretera a Rodas km 4, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba
fkherdez@ucf.edu.cu, ragoyti@ucf.edu.cu, jcabello@ucf.edu.cu

RESUMEN

En el trabajo se realiza una investigación experimental de las uniones por remachado de embutido a través de la cual se caracteriza la notable influencia que tiene la forma de la curva de interfase de la unión en la resistencia mecánica de la misma y se desarrolla el Esquema de Análisis de la unión por remachado de embutido, el cual no aparece descrito en la literatura técnica sobre el tema y se obtienen novedosas expresiones para el cálculo de las presiones de contacto en la superficie de interfase, las fuerzas internas y tensiones en la espiga de la unión y las ecuaciones para la evaluación de la resistencia de las mismas. Se comparan los resultados de la carga límite obtenida para las uniones con las obtenidas por otros autores por expresiones empíricas y semiempíricas y con los resultados experimentales y se demuestra que la exactitud del pronóstico es por mucho más exacta que la obtenida por otros autores.

ABSTRACT

In this paper is carried out an experimental investigation of the clinched connections through which is characterized the notable influences that has the form of the curve of interface in the mechanical strength of the union and is carry out a new analysis scheme of the union, which doesn't appear described in the technical literature on the topic and novel expressions are obtained for the calculation of the contact pressures in the interface surface, the internal forces and tensions in the spike of the union and them equations for the evaluation of the resistance of the same ones. The results of the load limit are compared obtained for the unions with those obtained by other authors by empiric expressions and with the experimental results and it is demonstrated that the accuracy of the presage is for much more exact that the one obtained by other author

NOMENCLATURA

- d_{ox} Diámetro de la Superficie de Interfase en la posición X
X Posición de la sección con relación a la superficie de unión de las láminas
 Q_y Fuerza de cortante en la sección de la espiga
 Mf_z Momento flector en la sección de la espiga
 $\sigma_{ap0}, \sigma_{ap1}, \sigma_{ap2}$ Tensiones de aplastamiento en la superficie de interfase
 τ_{max}, σ_{max} Tensión tangencial máxima y tensión normal máxima en la sección de la espiga de la unión
 $\sigma_{eq(x)}$ Tensión equivalente según la Cuarta Hipótesis de Resistencia, en la posición donde la sección de la espiga se bifurca por la presencia del orificio de la espiga (Fig. 3)
 σ_{ut} Resistencia máxima a tracción del material de las láminas.
Wpl - Momento resistente plástico de la sección transversal de la espiga
 $\sigma_{lim} = \sigma_{ut}$ - Tensión límite a tracción igual a la resistencia máxima de la tracción del material de las láminas
 P_{lim} Carga límite que puede soportar kla unión.

INTRODUCCIÓN

Desde el año 1999 los autores de este trabajo investigan las particularidades de estas uniones [1,2,3,4,5,6]. En el presente trabajo, el enfoque más importante en que se desarrolla la labor de los autores, consiste en el planteamiento del Esquema de Análisis y la obtención de un Modelo para realizar el cálculo de las reacciones de contacto, las fuerzas internas y las tensiones que se desarrollan en las uniones por remachado de embutido sometidas a cargas, y así poder realizar los cálculos necesarios y comprobaciones a este tipo de uniones. Con este resultado se contribuirá a ampliar las posibilidades de generalización de un nuevo procedimiento, al contar con una vía práctica para el desarrollo de cálculos mencionados y así ampliar el uso a escala industrial de la metodología propuesta y con ello obtener, la herramienta adecuada para la selección de los parámetros que garanticen un correcto proceso de enlace de las láminas. Este estudio permitirá predecir, al ser establecidos los parámetros tecnológicos más adecuados, cuál será la resistencia máxima a soportar por la unión.

Esta tecnología a pesar de estar patentada por la firma TOX Pressotechnick, Alemana, desde el año 1986 y de estar siendo investigada por el profesor Dr. Juha P. Varis de la Universidad Técnica de Lappeenranta en Finlandia desde, hace ya una década desde el punto de vista tecnológico, en lo referente a la selección adecuada del troquel y del punzón para un conformado eficiente de la unión que garantice una adecuada resistencia experimental, no se ha desarrollado hasta el momento una metodología que permita calcular las fuerzas de reacción que se originan entre la espiga y la cavidad que se forman respectivamente en las láminas de la unión durante el conformado de la misma, no existe tampoco una metodología que permita calcular las fuerzas internas ni las tensiones en la espiga donde se produce la fractura, ni se han explicado desde el punto de vista teórico las diferentes causas de las averías que se pueden presentar en la unión. Sin embargo, resulta posible, tomando en cuenta los parámetros geométricos fundamentales de un conjunto de uniones investigadas experimentalmente, elaborar un Esquema de Análisis que permita, aplicando los Métodos de la Mecánica de Materiales, obtener expresiones para determinar las fuerzas de contacto de acción y reacción que se originan entre la espiga y la cavidad de las piezas de la unión así como las fuerzas internas y las tensiones que surgen en cualquier sección de la misma, las cuales permitirán evaluar la resistencia de una unión cualquiera, y pronosticar la carga límite que esta pueda soportar.

DESARROLLO

En el Trabajo se realizó una investigación experimental acerca de los parámetros tecnológicos de fabricación y de la resistencia de un número considerable de uniones por remachado de embutido, donde se demostró la importancia que tiene la forma de la curva de interfase en la resistencia de las uniones de este tipo [6]. En la Fig. 1 se muestra una unión cortada donde se puede apreciar la forma en S de una unión adecuadamente conformada. Esta configuración es la que garantiza la adecuada resistencia de la unión. Si la misma es poco pronunciada la espiga se desprende de la cavidad, si por el contrario es muy pronunciada, se debilita la resistencia de la unión al hacerse muy fina la sección de la espiga.

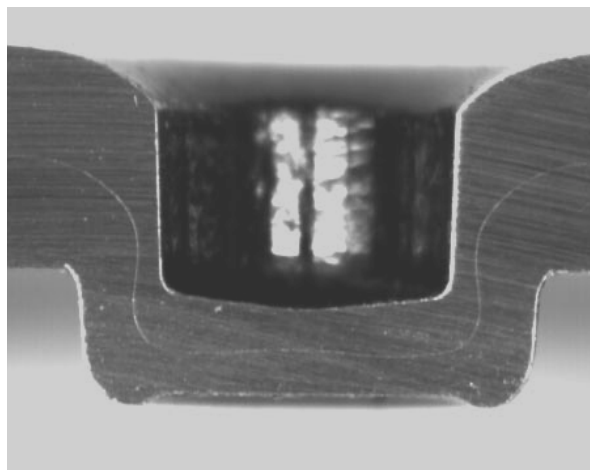


Fig. 1 Corte de una unión por remachado de embutido

Se realizó un diseño experimental para la obtención de las coordenadas de las curvas de la superficie de interfase para un total de tres aceros formables y un acero estructural. Las coordenadas alcanzadas se procesaron para la obtención de la ecuación que describe la forma de la superficie de la curvatura de interfase, obteniéndose un polinomio de cuarto orden, del tipo: $dox = 2 \cdot (A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4)$

Por la importancia que esta ecuación presenta para el esquema de análisis propuesto se obtuvieron modelos que relacionan las variables del polinomio alcanzado con los parámetros tecnológicos utilizados.

En la Fig. 2 se muestra el Esquema de Análisis planteado para este tipo de unión. Aplicando las Ecuaciones de Equilibrio y el Método de las Secciones se obtuvieron novedosas expresiones para el cálculo de las presiones de contacto en la superficie de interfase, las fuerzas internas y las tensiones en la espiga de la unión, las cuales por su complejidad y extensión fue necesario omitirlas en el presente artículo. En el mismo solo se hace mención a los resultados obtenidos y se explica el procedimiento y los resultados para hallar la carga límite de la unión y se comparan los resultados experimentales y analíticos obtenidos con los de otros autores

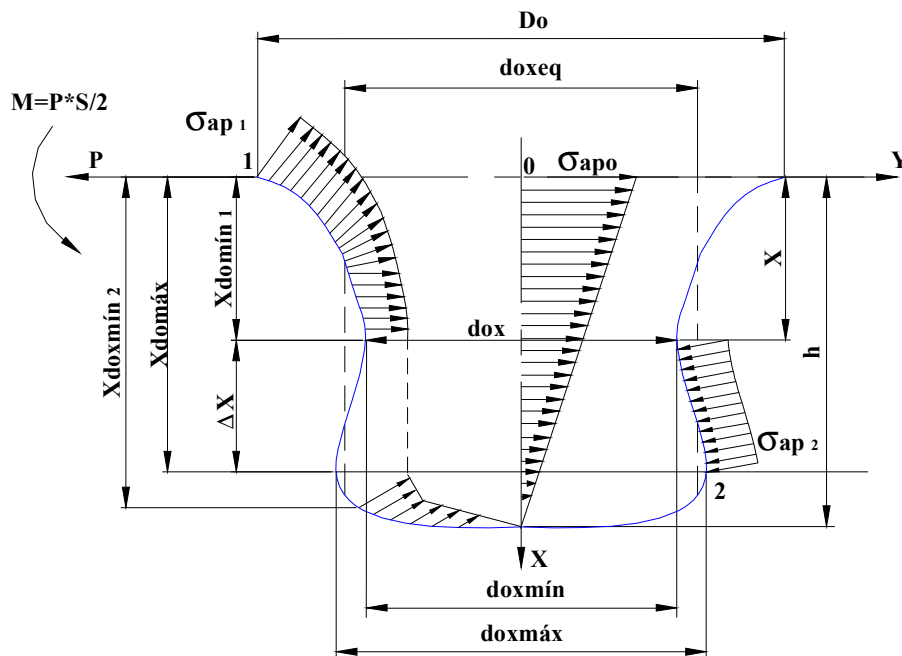


Fig. 2 Esquema de Análisis de la Unión por Remachado de Embutido

Las ecuaciones elaboradas fueron procesadas en una hoja de cálculo del software Excel, los resultados obtenidos se presentan para el caso de la combinación número cuatro del material RACOLD 01F. Para el cálculo de las tensiones se aplicó la Teoría de la Flexión Transversal. Las tensiones tangenciales máximas provocadas por la fuerza de cortante en una sección cualquiera de la espiga, se calculan por la ecuación de Zhurasvski. La expresión para el cálculo de la tensión tangencial máxima (que se produce a la altura de la línea neutra (eje Z), de una sección circular hueca de diámetro exterior dox e interior d ; aparece resuelta por Feodosiev [7], y se muestra a continuación.

$$\tau_{máx} = \frac{16}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{Qy}{\left[2(A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4)\right]^2 - d^2} \quad (1)$$

Las tensiones normales se calculan por la Ecuación Clásica de Navier. La tensión normal máxima se produce donde $y = y_{máx}$, o sea, en los puntos más alejados de la línea neutra (eje Z) y es:

$$\sigma_{\max} = \frac{Mfz}{Wz} = \frac{Mf}{\frac{\pi}{32} \cdot (dox^3 - d^3)} = \frac{32}{\pi} \cdot \left[\frac{Mfz}{\left[2 \cdot (A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4) \right]^3 - d^3} \right] \quad (2)$$

Por lo tanto con las ecuaciones anteriores y las dependencias $Qy = f(x)$ y $Mfz = f(x)$, se pueden calcular los valores de τ_{\max} y σ_{\max} para las diferentes secciones a lo largo de la profundidad de la superficie de interfase.

Los puntos más peligrosos de la sección desde el punto de vista de la combinación de las tensiones normales y tangenciales, son los puntos que están sobre la línea donde comienza a bifurcarse la sección por la presencia del agujero del punzón (Fig. 3). La tensión normal en estos puntos de la sección se calcula para la ecuación de Navier:

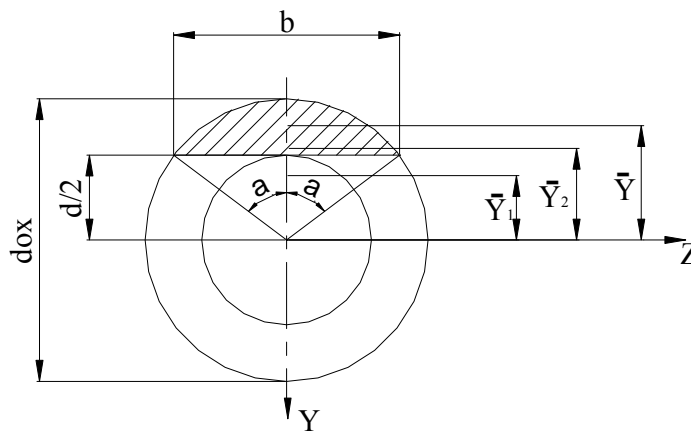


Fig. 3 Corte de la sección de la espiga.

$$\sigma = \frac{Mfz(x) \cdot y}{Iz} = \frac{64 \cdot Mfz(x) \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot (dox^4 - d^4)} = \frac{32}{\pi} \cdot \frac{Mfz(x)}{(dox^2 - d^2)} \quad (3)$$

Donde:

$$y = \frac{d}{2}, \quad e \quad Iz = \frac{\pi}{64} \cdot (dox^4 - d^4) \quad (4)$$

La tensión τ se calcula por la ecuación de Zhuravski:
$$\tau = \frac{Qy(x) \cdot S'z}{b \cdot Iz} \quad (5)$$

El momento estático $S'z$, de la sección rayada es:

$$S'z = \frac{dox \cdot (dox^2 - d^2) \cdot \text{sen } \alpha}{12}$$

Y el ancho de la sección b es:

$$b = 2 \cdot \frac{dox}{2} \cdot \text{sen } \alpha = dox \cdot \text{sen } \alpha$$

Sustituyendo en la expresión (5), se tiene que:

$$\tau = \frac{16}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{Qy(x) \cdot (dox^2 - d^2)}{(dox^4 - d^4)} \quad (6)$$

Según la 4ta Hipótesis de Resistencia o Hipótesis de la Energía de Cambio de Forma (Huber-Mises-Hencky):

$$\sigma_{eq(x)} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{\left(\frac{32}{\pi} \cdot \frac{Mfz_{(x)} \cdot d}{dox^4 - d^4}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{16}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{Qy_{(x)} \cdot (dox^2 - d^2)}{(dox^4 - d^2)}\right)^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{eq(x)} = \frac{16}{\pi \cdot (dox^4 - d^4)} \sqrt{4 \cdot Mfz_{(x)}^2 \cdot d^2 + \frac{Qy_{(x)}^2 \cdot (dox^2 - d^2)^2}{3}} \quad (8)$$

La condición de fractura de la unión será:

$$\sigma_{eq(x)} = \frac{16}{\pi \cdot (dox^4 - d^4)} \sqrt{4 \cdot Mfz_{(x)}^2 \cdot d^2 + \frac{Qy_{(x)}^2 \cdot (dox^2 - d^2)^2}{3}} = \sigma_{ut} \quad (9)$$

Para la evaluación de la resistencia de una unión por remachado de embutido se pueden emplear los dos métodos empleados comúnmente por la Mecánica de Materiales [7,8] que son:

1. Método de las tensiones admisibles.
2. Métodos de las cargas límites.

Los distintos autores que en la literatura consultada han enfrentado de alguna manera el cálculo de las uniones por remachado de embutido han utilizado el método de las cargas límites, razón por la cual en el presente trabajo se analizará solamente este método. En este caso se conocen los parámetros constructivos y tecnológicos de una unión y se desea pronosticar que carga será capaz de soportar hasta la rotura. Al aplicar el método hay que tomar en cuenta que antes de alcanzar la rotura la unión tiene que pasar por la fluencia, lo que provoca una redistribución de las tensiones y el cálculo de las tensiones no se realiza por las mismas expresiones que se vieron anteriormente. Se verán a continuación las particularidades de estos cálculos.

En el caso de la flexión la tensión máxima en el momento límite se puede calcular según Pisarenko [8] por la expresión:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{fz}}{W_{pl}} = \sigma_{lim} \quad (10)$$

Donde:

Según Pisarenko [8] para una sección circular hueca: $W_{pl} = 1,7Wz = \frac{1,7 \cdot \pi \cdot (dox^3 - d^3)}{32}$, y por lo tanto:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{32}{1,7 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{Mfz_p(x)}{\left[2 \cdot (A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4)\right]^{\frac{1}{3}} - d^3} \right) = \sigma_{lim} \quad (11)$$

El problema estriba en que no se conoce el valor de la carga, que es la que se desea despejar. De acuerdo con el procedimiento establecido en el presente trabajo se propone la metodología siguiente: Como el momento $Mfz_p(x)$ es proporcional a la carga (P) aplicada a la unión, este se escribirá como sigue:

$$Mfz_p(x) = Mfz_{p=1}(x) \cdot P \quad (12)$$

Si se sustituye esta expresión en la ecuación anterior y se despeja (P), se obtendrá el valor de la carga P que para cada valor de X provoca que: $\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_{lim}$. Esta carga es la carga Plim, cuyo valor se puede calcular por la expresión que se obtiene a continuación, para los diferentes valores de X. La carga Plim de la unión será el valor límite mínimo obtenido en el intervalo de $0 \leq X \leq X_{dox\acute{m}in}$. O sea:

$$Plim = \left(\frac{1,7 \cdot \pi \cdot \sigma_{lim} \cdot \left[2 \cdot (A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4) \right]^3 - d^3}{32 \cdot Mfz_{(p=1)}(x)} \right)_{\min} \quad (13)$$

Los valores de $Mfz_{(p=1)}(x)$ se calculan para P = 1, para entonces variando X en el intervalo mencionado obtener el valor de Plim, cuando el resultado obtenido en el término entre paréntesis en la ecuación anterior, sea mínimo.

En el caso del cortante cuando se alcance la condición límite las tensiones habrán superado la fluencia y no se distribuirán en la sección transversal según la Ley de Zhuravski, sino uniformemente a través de toda la sección. La tensión tangencial máxima se calculará entonces como:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Q_{yP}(x)}{\frac{\pi}{4} \cdot \left[\left(2 \cdot (A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4) \right)^2 - d^2 \right]} = 0 \quad (14)$$

Se aplicará el mismo procedimiento:

$$Q_{yP}(x) = Q_{yP=1}(x) \cdot P$$

Ahora se despeja P:

$$Plim = \left(\frac{\tau_{lim} \cdot \pi \cdot \left[\left(2 \cdot (A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4) \right)^2 - d^2 \right]}{4 \cdot Q_{y(P=1)}(x)} \right)_{\min} \quad (15)$$

Igualmente los valores de $Q_{yP=1}(x)$ se calcularán para P = 1, en el intervalo ya mencionado en el epígrafe anterior y el valor de Plim se corresponderá con el mínimo resultado del término entre paréntesis de la ecuación anterior.

A modo de comparación de los pronósticos realizados por diferentes autores se analizará una unión por remachado de embutido con los siguientes datos:

Material RACOLD 01F con $\sigma_u = 410$ MPa.

Diámetro de la matriz $d_M = 8$ mm

Diámetro del punzón $d_P = 5,4$ mm

Diámetro mínimo de la garganta $dox_{min} = 6,04$ mm

La carga límite experimental para una unión con estos parámetros resultó ser Plim = 6 730 N.

A continuación empleando los modelos propuestos por los autores, se realizarán los cálculos de pronóstico de carga límite, para el caso mencionado.

Según Davies [9], para el cálculo de la carga límite se puede emplear la siguiente expresión de base empírica:

$$P_{lim} = [5,6309 \cdot 10^{-3} - 2,6540 \cdot 10^{-5} \cdot (\alpha)] \cdot (\sigma_r^{0,98} \cdot e^{1,45}) \quad (\text{kN}) \quad (16)$$

En este caso:

$\alpha = \frac{\pi}{2}$, ángulo entre la dirección de la carga y el eje del punzón.

$\sigma_r = 410 \text{ MPa}$, límite de resistencia del metal.

$e = S = 1 \text{ mm}$; espesor de la lámina del metal.

$$P_{lim} = 5,63009 \cdot 10^{-3} - 2,6540 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot (410)^{0,98} \cdot (1)^{1,45} = 2\,032 \text{ N} \quad (17)$$

Martikka [10], propone la siguiente expresión también base empírica:

$$P_{lim} = R_m \cdot K_{ring} \cdot A_{ring} \cdot \frac{F(s)}{1+S} \quad (\text{N}) \quad (18)$$

$R_m = \sigma_u = 410 \text{ MPa}$

$K_{ring} = \frac{1}{2}$; si una mitad del anillo es la que se rompe.

$A_{ring} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_M^2 - d_p^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (8^2 - 5,4^2) = 27,36 \text{ mm}$, área entre las herramientas (matriz y punzón).

$S = 1 \text{ mm}$ espesor de las láminas.

$F(s)$, es un coeficiente que depende del espesor de las láminas para $S = 2 \text{ mm}$, vale $F(s) = 1$ y para $S = 0,55 \text{ mm}$; interpolando para $S = 1 \text{ mm}$ se obtiene $F(s) = 0,69$

Sustituyendo en la expresión:

$$P_{lim} = 410 \cdot \frac{1}{2} \cdot 27,36 \cdot \frac{0,69}{2} = 1\,935 \text{ N}$$

Helenius [11] propone la siguiente expresión:

$$P_{lim} = \pi \cdot (dp + t_{min}) \cdot t_{min} \cdot \tau_u \quad (\text{N}) \quad (19)$$

Donde:

$dp = 5,4 \text{ mm}$, diámetro del punzón.

$t_{min} = 0,32 \text{ mm}$, espesor mínimo de la garganta.

$\tau_u = \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} = \frac{410}{\sqrt{3}} = 236,7 \text{ MPa}$, estimación de la resistencia máxima a cortante para un material dúctil según el criterio de Von Mises.

Helenius no propone ningún criterio para estimar: t_{min} . Para poder comparar con esta expresión se calculó: t_{min} , para los resultados experimentales obtenidos por los autores del presente trabajo.

$$t_{min} = \frac{dox_{min} - d}{2} = \frac{6,04 - 5,4}{2} = 0,32 \text{ mm}$$

Sustituyendo y calculando:

$$P_{lim} = \pi \cdot (5,4 + 0,32) \cdot 0,32 \cdot 236,7 = 1\,361 \text{ N}$$

Ahora bien, según la metodología propuesta en el presente trabajo para el caso de la carga límite provocada por la tensión tangencial máxima, en la sección de la garganta que varía desde: $0 \leq X \leq dox_{min1}$, y en el material que se emplea, se obtuvo un valor de $P_{lim} = 6\,993,4 \text{ N}$

Como se aprecia el valor mínimo de carga que se obtiene con este pronóstico es de 6 993,4 N, resultado que supera ligeramente el valor de la carga máxima alcanzada en este caso (6 730 N). Para otros experimentos y con otros materiales el pronóstico en ocasiones quedó por debajo y en algunos casos casi fue exacto. Por lo tanto, es modelo elaborado es el que más se acerca a la carga límite obtenida experimentalmente

Para el caso de la ecuación para el cálculo de la carga límite que provoca el efecto de la tensión normal el valor más pequeño obtenido es de 100 227.57 N, por lo tanto para el caso que se analiza, la condición límite se alcanza por el efecto de la tensión tangencial máxima.

CONCLUSIONES

1. El remachado de embutido, es un método de unión que embute partes de láminas de metal en el área específica de la unión, sin la utilización de elemento adicional alguno. En él se emplean dos herramientas (matriz y punzón) que son seleccionadas según las características de los elementos a unir, que permiten alcanzar un enlace entre las láminas de metal, impidiendo de esta manera el deslizamiento mutuo entre éstas.
2. La resistencia de la unión depende de la forma que alcance la curvatura interlaminar o de interfase y ésta a su vez depende entre otros, de los siguientes factores:
 - La correcta selección de las herramientas de trabajo y con ello la diferencia adecuada entre los diámetros exteriores del cuello del punzón e interior de la matriz.
 - La óptima selección de la penetración del punzón, o sea, del espesor del fondo de la unión.
3. En el trabajo realizado se ha podido establecer que las curvas interlaminares o curvas de las superficies de interfase, poseen especial importancia en cuanto a resistencia de la unión se refiere. Como parte del trabajo experimental realizado se obtuvieron las ecuaciones de correlación que establecen la dependencia de la geometría de esta curva en función de los parámetros tecnológicos de la unión y del material.
4. Se elaboró el Esquema de Análisis de la unión bajo carga que define cuáles son las fuerzas recíprocas de contacto de acción y reacción que surgen entre la espiga y la cavidad de la unión y establece las leyes de distribución de las mismas a través de toda la superficie de interfase. Este Esquema de Análisis se definió con diversos niveles de complejidad para obtener las soluciones exactas y aproximadas obtenidas.
5. Se obtuvieron expresiones, inexistentes hasta la fecha, que permiten calcular los valores de tensiones de aplastamiento surgen entre la espiga y la cavidad de la unión. Se obtuvieron expresiones, inexistentes también hasta la fecha, que establecen las dependencias de las fuerzas internas $Q_y = f(X)$ y $M_f(z) = f(X)$ en las diferentes secciones de la espiga de la unión.
6. Aplicando la Teoría de la Mecánica de Materiales y haciendo uso de las dependencias $Q_y = f(X)$ y $M_f(z) = f(X)$ se obtuvieron las expresiones d: $\tau_{max} = f(X)$, $\sigma_{max} = f(X)$ y $\sigma_{eq} = f(X)$ y sus respectivas distribuciones a lo largo de la longitud de la espiga de la unión.
7. Se estableció un procedimiento general para la evaluación de la resistencia de las uniones que vincula esta con los resultados obtenidos en función de la geometría de la superficie de interfase permitiendo pronosticar la carga límite que puede soportar la misma.

REFERENCIAS

- [1] Hernández González, Frank. Punzones para el remachado de embutido. Algunas consideraciones sobre una incorrecta selección. Revista Ingeniería Mecánica (La Habana), (2): 59-63, Mayo/ Agosto de 2002.
- [2] Hernández González, Frank. Diseño de una máquina experimental para la aplicación de la tecnología clinching/ Frank Hernández González; Juan J. Cabello Eras, tutor.-- Trabajo para obtener el título de Master en Ciencias, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Departamento de Mecánica, 2002.-- 140 h.
- [3] Hernández González, Frank. El remachado de embutido: Una opción interesante para la unión de láminas. Revista Ingeniería Mecánica (La Habana) 6, (2), Mayo/Agosto de 2003.
- [4] Hernández González, Frank. Determinación de los parámetros adecuados de trabajo en la unión de láminas de metal de alta formabilidad, por el método clinching. Revista Ingeniería Mecánica (La Habana) 7, (1), Enero/Abril de 2004.
- [5] Hernández González, Frank. Investigación experimental para la determinación de las ecuaciones que caracterizan la unión efectuada con la tecnología clinching. Revista Ingeniería Mecánica (La Habana) 7, (1), Enero/Abril de 2004.

- [6] Hernández González, Frank. Desarrollo del Esquema de Análisis y Evaluación de la Resistencia Mecánica de la Uniones por Remachado de Embutido de Simple Botón / Juan J. Cabello Eras, Rafael Antonio Goytisoló Espinosa, tutores.—Tesis en Opción del Grado Científico de de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, Departamento de Mecánica, 2006.—108 h.
- [7] Feodosiev, V.I. Resistencia de Materiales/ V.I. Feodosiev.-- Moscú: Editorial MIR, 1985.-- 583 p.
- [8] Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.K. Manual de Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1989.—693 p.
- [9] Davies, R.F. The shear behaviour of press-joining in cold-formed steel structures. Revista Thin-Walled Structures (Australia) 25, (3): 153-170, Enero de 1996.
- [10] Martikka, H.I. Clinch joint test simulation and optimum design/ H. I. Martikka.-- En su: Welding conference LUT Join '99.-- Lappeenranta:[s.e.], 1999.-- 380-391 p.
- [11] Helenius, Antti. Shear strength of clinched connections in light gauge steel/ Antti Helenius. Finlandia: VTT Research Notes 2029, 2000.-- 53 p.