

# GEOMIN'93

## CONFERENCIA INTERNACIONAL DE MINERIA, GEOLOGIA Y METALURGIA

DEL 26 AL 30 DE OCTUBRE DE 1993  
MOA, HOLGUIN, CUBA

ISMM-UNI-MERCADU

El Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM) y la Unión del Níquel de Cuba se complacen en invitarlo a participar en GEOMIN'93, Conferencia Internacional de Geología, Minería y Metalurgia del Níquel y el Cobalto, que se efectuará los días 26, 27, 28, 29 y 30 de Octubre de 1993 en la ciudad de Moa, provincia Holguín, Cuba, dedicada al 50 Aniversario de la Industria Cubana del Níquel.

### OBJETIVOS

- Promover el intercambio de experiencias sobre las importantes temáticas del evento.
- Estructurar los vínculos de colaboración científico-técnica con especialistas y/o docentes de la rama de todo el mundo.

### COMITE ORGANIZADOR

#### PRESIDENTE

Dr. Gerardo Orozco Melgar  
Facultad de Geología ISMM

#### VICEPRESIDENTES

Dr. Juan Rodríguez Gamboa  
Facultad de Metalurgia ISMM

Ing. Eduardo Bastón Núñez

Dirección de Minas  
Unión del Níquel

#### MIEMBROS

Dr. José Otaño Noguel  
Facultad de Minería ISMM  
Presidente Comisión Técnica

Ing. Nicolás Muñoz Gómez  
Facultad de Geología ISMM  
Vicepresidente Comisión Técnica

### TEMATICAS

1. Geología, búsqueda, exploración y control de la explotación de los yacimientos lateríticos.
2. Explotación de los yacimientos lateríticos.
3. Topografía.
4. Mecanización de los trabajos mineros.
5. Informática aplicada a la geología, minería y la metalurgia del Níquel y el cobalto.
6. Protección del Trabajo.
7. Rehabilitación e ingeniería ambiental.
8. Metalurgia del Níquel y el cobalto.
9. Ahorro de portadores energéticos en las labores Geólogo-Minero-Metalúrgicas.

### FORMAS DE PRESENTACION

- Presentación de ponencias.
- Informes de Resultados de Investigación.
- Presentación de Posters y/o Exposiciones.
- Intervenciones en las Mesas Redondas.
- Oyente y/o acompañante.

### ORGANIZACION DEL EVENTO

- Conferencias Plenarias.
- Sesiones de Trabajo.
- Posters.
- Visitas Técnicas.
- Exposiciones.

### PROGRAMA PRELIMINAR

- 26 de octubre. Arribo a la ciudad de Moa. Alojamiento y Acreditación
- 27 de octubre. Apertura Oficial. Conferencias Plenarias. Inicio de Sesiones.
- 28 de octubre. Sesiones de trabajo y Visitas Técnicas.
- 29 de octubre. Visita Técnica a la Mina Nicaro.
- 30 de octubre. Mesas Redondas. clausura. Cena de Despedida.

### PROGRAMA PARA ACOMPAÑANTES

- Excursión a la Playa de Cayo Moa.
- Visita a Pinares de Mayarí.
- Recorrido cultural por la ciudad.
- Excursión Turística a Baracoa, primera villa fundada en Cuba.

### NORMAS DE PRESENTACION DE LOS TRABAJOS

1. Cada autor deberá enviar un resumen de su ponencia mecanografiado a dos espacios en formato A4 (205 x 280 mm) con una extensión máxima de 5 cuartillas, las cuales incluirán los dibujos, tablas y bibliografía.
2. El resumen debe estar precedido por: Título. Nombres y Apellidos del autor o los autores. Dirección, teléfono y fax. Texto.
3. El resumen deberá enviarse antes del 30 de junio de 1993. El resultado de decisión del Comité Organizador se le comunicará a los autores antes del 15 de julio de 1993.
4. Los trabajos completos se enviarán al Comité Organizador antes del 15 de septiembre de 1993.
5. Los interesados pueden remitir sus documentos por mensajería mundial, por correo, entregarlos personalmente o a través de su propia Agencia de Viajes que debe coordinar con MERCADU en La Habana.

### CUOTA DE INSCRIPCION

Delegados	
Extranjeros	\$ 80.00 USD
Acompañantes	\$ 50.00 USD
Nacionales	\$ 80.00 PC

La CUOTA DE INSCRIPCION otorga el derecho de participación en las Conferencias Plenarias, Sesiones de Trabajo, Mesas Redondas, Posters y Exposiciones, y a la documentación del evento para participantes.

### IDIOMA OFICIAL

El idioma oficial será el Español aunque se aceptarán trabajos en Inglés.

### COSTO DE HOSPEDAJE Y ALIMENTACION

\$ 260.00 USD por 7 noches/8 días.

INCLUYE: Transfer Aeropuerto de Moa-Residencia-Aeropuerto de Moa. Brindis de Bienvenida. Alojamiento en Residencia Universitaria. Servicios de Guías. Transporte a las actividades oficiales del programa.

NOTA IMPORTANTE: Los participantes deben coordinar con su Agencia de Viajes todo lo concerniente a su acceso a Moa. Con 30 días de antelación deberá comunicar a SERVICIOS MERCADU su confirmación. MERCADU no se responsabiliza con la acreditación en el evento de aquellas personas que no hayan comunicado previamente su participación.

### DATOS SOBRE LA SEDE

La ciudad de Moa fue fundada el 24 de septiembre de 1833 con el nombre de "Pueblo Nuevo de Vives de Moa" por 22 familias procedentes de las Islas Canarias, España. Moa (voz indígena Arauca) es bañada por el Mar Caribe y se encuentra en la zona oriental de Cuba, en la provincia de Holguín. Al sur colinda con las provincias de Santiago de Cuba y Guantánamo.

La base económica fundamental es la extracción e industrialización minera a través de un conjunto de Plantas, Talleres, Centros de Investigación, Instalaciones Portuarias, Complejo Hidráulico y la gran Planta Nicaro para conformar la actual industria Cubana del Níquel.

La infraestructura social está formada por: SISTEMA DE SALUD que comprende un hospital Clínico Quirúrgico, un hospital Pediátrico, 85 Consultorios de Médicos de Familia y 3 Policlínicos. SISTEMA EDUCACIONAL completo que incluye una Universidad donde se forman los ingenieros y profesionales de alta calificación. SISTEMA CULTURAL, DEPORTIVO Y RECREATIVO con variadas instalaciones deportivas, hoteles, galería de arte, museo, casas de cultura, camping, entre otras.

### DIRIJA SU SOLICITUD DE INSCRIPCION A:

Dr. Secundino Marrero Ramírez  
GERENTE COMERCIAL ISMM  
Vice Rectoría de Investigaciones y Educación de Postgrado.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM)  
Las Coloradas, Moa, Holguín 83300 Cuba.  
Teléf. 6 6678/6 6502/6 4214 Télex 021-397 Fax 33 5302

Puede dirigirse en La Habana a:

Lic. Roberto Rosado  
GERENTE DE TURISMO ESPECIALIZADO MERCADU  
Calle 13 No. 951 esq. 8 Vedado 12300  
La Habana, Cuba.  
Teléf. 33 3893 Fax 33 3028 Télex 512130 MCDU CU

## CONSIDERACIONES TEORICAS PARA LA UNION DE PLANCHAS POR EXPLOSION

Benito Casals G.

Instituto Superior Minero Metalúrgico.

**RESUMEN:** Se describen algunas fórmulas que gobiernan en su conjunto el proceso de soldadura de planchas con el uso de la energía emanada de una explosión, ellas ayudan a buscar los parámetros óptimos para que la unión sea de un carácter metalúrgico. Se hace un breve análisis de cómo tienen que ser las sustancias explosivas para este proceso. Las gráficas que aparecen pueden servir para la orientación en la búsqueda de los parámetros que dan mejores resultados aunque las mismas no constituyen un material de trabajo por cuanto no se han hecho con escalas exactas. Cómo ha de ponerse la sustancia en la plancha volante y la situación del detonador para evitar deformaciones excesivas.

**ABSTRACT:** This paper concerned with several formulas that direct the explosive welding process with the use of energy from explosion, they help to find the best parameters in order to have a metallurgic character in the joint. A brief analysis of explosive substances is done for this process. The diagrams given can not be used for serious experiments because they haven't been done with accurate scales, but they can help in the direction of researching the parameters with best result. It deals with how to put the substance over flying plate and the detonator to avoid excessive deformations.

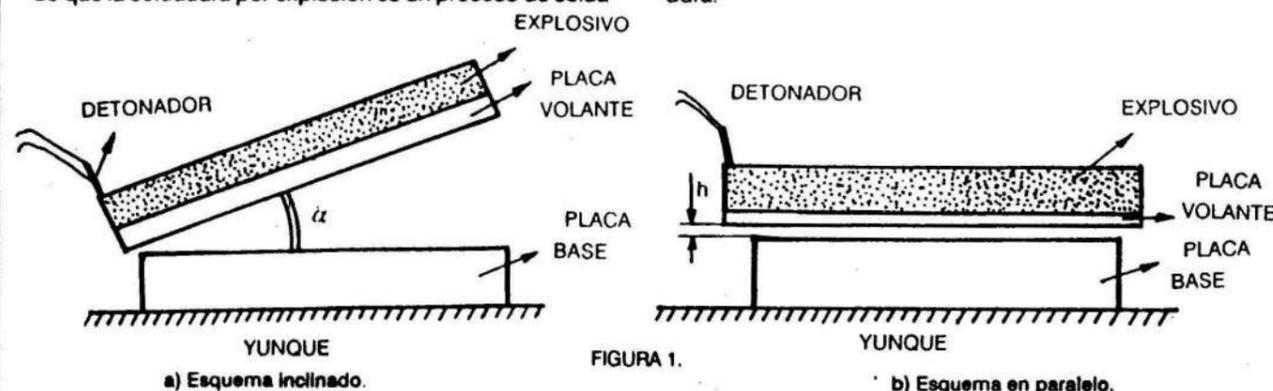
### COMENTARIOS. FORMULAS TEORICAS

Desde 1956 hasta 1979 aparecieron en la literatura mundial numerosos artículos en diversas publicaciones, conferencias magistrales y simposios u otro tipo de eventos científicos que de una forma u otra trataban acerca de la soldadura de planchas, superficies cilíndricas y tuberías por explosión; desde 1980 hasta la actualidad el número de publicaciones se ha incrementado y este proceso ha llegado a países como Cuba que no tienen un desarrollo industrial comparable con el de los países de Europa.

Los autores consultados han llegado a la conclusión de que la soldadura por explosión es un proceso de solda-

dura en estado sólido y han atribuido el mecanismo de ella a la acción de un chorro metálico de alta velocidad que se produce por el impacto oblicuo de la chapa de menor espesor comúnmente llamada plancha volante contra la plancha de mayor espesor, llamada plancha base.

Existen dos esquemas fundamentales para disponer las planchas cuando se quiere obtener un bimetálico (cladding) determinado (Figura 1); en cuyos esquemas se dan los parámetros geométricos que deben guardar las planchas entre ellas para llevar a cabo el proceso de soldadura.



El esquema inclinado es para cuando se usa una sustancia explosiva (SE) con una alta velocidad de detonación, aunque también se puede usar para SE de baja velocidad de detonación; este esquema tiene muchos inconvenientes prácticos que lo han puesto en desventaja con el esquema en paralelo que es mucho más maniobrable.

Como resultado de numerosos trabajos experimentales se han obtenido datos acerca de los regímenes crí-

cos de la formación de ondas para la obtención de una unión resistente. Teniendo en cuenta algunos conocimientos preliminares de una explosión aparece que:

$$P > P_{crit} \quad (1)$$

Este criterio señala que la presión que se desarrolle en el choque debe, como mínimo sobrepasar un valor límite ( $P_{crit}$ ) que está en relación con el límite de resistencia dinámica de los metales a soldar.

En la soldadura por explosión existen parámetros dinámicos que responden a las propiedades mecánicas de los metales que se sueldan (Figura 2). Por eso cuando se sueldan en paralelo la velocidad de contacto  $V_c$  se hace igual a la velocidad de detonación de la SE (D).

$$V_c = D \quad (2)$$

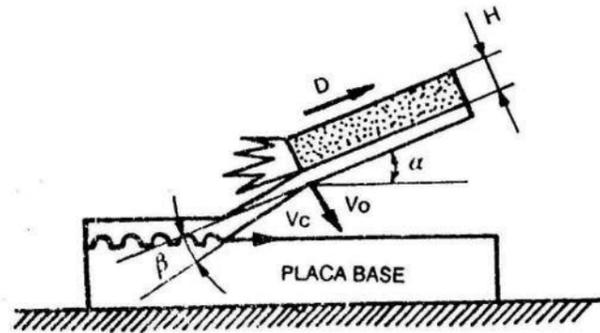


FIGURA 2

$\beta$  Angulo de flexión dinámica durante el proceso de soldadura.  
 $\alpha$  Angulo inicial entre placas.

Para que ocurra la soldadura, la velocidad de contacto entre planchas debe ser menor que la menor velocidad sónica de los metales a soldar (C).

$$V_{crit} < C \quad (3)$$

Si sucediera lo contrario; que la velocidad de detonación fuera mayor que la velocidad sónica de uno de los metales como la soldadura de este tipo tiene su base en la deformación en las intercaras, esta no ocurre porque los cuerpos sólidos tienen una velocidad límite de deformación que está en correspondencia con la transmisión de ello de las ondas elásticas.

La onda de choque de una explosión es una onda de compresión que cumple con las mismas características de una onda elástica en un medio determinado.

Pero cuando aún la velocidad de detonación es menor que la velocidad sónica de los metales a soldar esta no debe sobrepasar un valor crítico porque se pueden producir picos de presiones muy elevados que pueden resquebrajar la plancha volante producto del choque entre ellas.

La acción de una fuerza bruscamente aplicada no es transmitida simultáneamente a todas las partes del cuerpo, en el instante inicial las zonas alejadas del mismo no son alteradas y las deformaciones provocadas por la fuerza se propagan a través del sólido en forma de ondas elásticas.

Para evaluar la calidad de una unión soldada por explosión es muy importante el grado de deformación que aparece en las intercaras de las planchas ya soldadas expresado en forma de los desplazamientos máximos ( $E_{max}$ ), en el límite de separación. Esta condición enlaza el límite de formación de una unión resistente con los parámetros energéticos del proceso.

$$Elim > E_{max} > E_{crit} \quad (4)$$

De acuerdo con esta condición, la magnitud de los máximos desplazamientos en el límite de separación de los metales debe sobrepasar una magnitud crítica ( $E_{crit}$ ) para que la energía gastada en la deformación asegure el grado de activación de las superficies que chocan y debe ser

menor que cierto valor límite ( $Elim$ ), para el cual el incremento de la amplitud de las ondas y sus irregularidades en la deformación plástica provoca torbellinos y fusión del metal, causando defectos en la zona de unión y la formación de compuestos intermetálicos cuando se sueldan metales no compatibles desde el punto de vista de la soldadura convencional.

Las particularidades características de la soldadura por explosión son: su alta intensidad, la instantaneidad y el lugar donde suceden las deformaciones plásticas.

Por eso se introduce una nueva condición para que suceda una unión de calidad.

$$t_1 > t_a > t_r \quad (5)$$

donde:

$t_1$  - tiempo de interacción

$t_a$  - tiempo de activación

$t_r$  - tiempo de regulación

El sentido de esta condición consiste en que en primer lugar, si el relajamiento de las tensiones no llega a ocurrir en el tiempo de activación de las superficies en contacto, en la zona de unión aparecen focos de fusión. En segundo lugar, la activación de toda la superficie de contacto, y la formación de enlaces químicos debe ocurrir antes que la onda de tracción llegue a la zona de contacto.

En el caso cuando  $t_1 < t_a$  la activación de toda la superficie de contacto no ocurre y los enlaces que se han formado en parte o totalmente son destruidos por la onda de tracción.

Por cuanto  $t_a$  depende de las características de los metales a soldar, el proceso de soldadura se puede gobernar cambiando los parámetros que determinan  $t_a$  y  $t_1$ .

Al detonar una sustancia explosiva distribuida uniformemente sobre una plancha metálica, los productos gaseosos de la explosión producen en el metal onda de choque. El frente de choque dentro del metal forma una zona comprimida en la cual la presión  $P_x$ , la velocidad de difusión  $V_{dif}$  de la onda de choque están relacionadas por la expresión:

$$P_x = \rho_0 V_x V_{dif} \quad (6)$$

donde:

$\rho_0$  densidad inicial del metal (que cambia después de la explosión).

$V_{dif} = a + \lambda V_x$ ;  $a$  y  $\lambda$  son coeficientes que dependen de la resistencia a la compresión de los metales al choque dinámico.

Las onda de choque al atravesar el metal crean ondas elásticas, las cuales se pueden analizar como un sistema de dos ondas, una longitudinal y otra transversal.

La velocidad de la onda longitudinal sobre la superficie de un cuerpo elástico (sólido) ilimitado depende del módulo de compresión volumétrico  $K$ , del módulo de torsión  $G$  y de la densidad inicial.

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho_0}} \quad (7)$$

La velocidad de las ondas transversales se determina por la expresión:

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho_0}} \quad (8)$$

Si en el metal actúan ondas de choque fuertes que provoquen el paso del metal a estado líquido, entonces en este caso  $C_t$ , que provoca el desplazamiento no puede surgir y la velocidad de difusión de las ondas longitudinales se determinan por la expresión:

$$C_L = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (9)$$

Por eso generalmente a  $C_L$  se le llama velocidad de difusión de las ondas plásticas y a  $C_t$  de las ondas elásticas.

La velocidad de deformación plástica del metal en la zona de choque de las dos planchas no debe sobrepasar  $C_L$ , es decir,

$$V_{del} < \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (10)$$

Variando la velocidad de detonación de la sustancia explosiva se puede variar la velocidad del punto de contacto  $V_c$ , para  $V_{crit}$  ocurre el paso de la configuración no ondulatoria a la ondulatoria en la zona de las intercaras.

$$V_{crit} = \sqrt{\frac{2 Re (HV_1 + HV_2)}{\rho_1 + \rho_2}} \quad (11)$$

donde:

$Re$  - número de Reynolds

$HV_1, HV_2$  - dureza según Vickers de las planchas a soldar

$\rho_1, \rho_2$  - densidad de las planchas a soldar

Este criterio también puede ser manejado tomando una velocidad crítica por debajo de la velocidad del sonido en las planchas a soldar y comprobando que:

$$Re = \frac{(\rho_1 + \rho_2) V_{crit}^2}{2(HV_1 + HV_2)} \geq 10 \quad (12)$$

Al determinar el valor máximo de la velocidad del punto de contacto se presupone que la velocidad de difusión de las ondas plásticas se determina solo por la compresibilidad del medio, es decir, que el módulo de torsión sea cero. Para alcanzar que se asegure el paso del medio desde el estado elástico al plástico se necesita una presión crítica que se valora por la resistencia teórica a la deformación plástica de los materiales a soldar.

$$P_{crit} = \frac{G}{2\pi} \quad (13)$$

Aunque es conocido que la tensión (presión) que se necesita para deformar los metales comúnmente comerciales está en el orden de 100 a 1 000 veces menor que  $G/10$  y  $G/50$ , esto debido a la no homogeneidad de la resistencia al corte (deslizamiento) en los puntos del plano de deslizamiento.

También se puede valorar que:

$$P_{crit} = K R_{p0.2} \quad (14)$$

$10 < K < 50$ .

$R_{p0.2}$  - límite de fluencia del material (anteriormente).

La dependencia de la velocidad del punto de contacto y la presión en la zona de choque se establece por el análisis de la configuración del flujo posible en los choques tangenciales.

$$P = \frac{\rho D^2}{K+1} \quad (15)$$

donde:

$\rho$  - densidad de la SE

$D$  - velocidad de detonación

$K$  - índice de la adiabática de los productos de la explosión.

El índice  $K$  tiene un valor igual a 3 para la mayoría de las SE.

Según la velocidad de choque de las planchas, la presión en la zona de contacto es una aproximación acústica.

$$P = \frac{\rho_1 C_1 \cdot \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} V_c \quad (16)$$

Esta expresión significa que la presión de la zona de choque se determina por la resistencia acústica de las planchas a soldar ( $\rho C$ ) y su velocidad de choque; la cual debe asegurar su valor crítico y depende de la velocidad de detonación de la SE y de la geometría de la soldadura.

Carpenter, remitiéndose a R. Wittman, toma que la velocidad mínima de choque  $V_c$  en la Figura 2 debe ser tal que la presión en el límite de choque sobrepase el límite elástico de Hugoniot en 5 veces o utilizar la expresión:

$$V_{cmin} \geq \sqrt{\frac{R_m}{\rho}} \quad (17)$$

donde:

$R_m$  - límite de resistencia a la tracción (anteriormente)

$\rho$  - densidad del material de la plancha volante

Una expresión similar se recomienda en [6].

$$V_{cmin} \geq 1,4 \sqrt{\frac{HV}{\rho}} \quad (18)$$

donde:

$HV$  - dureza según Vickers.

Para tener en cuenta las propiedades físico-térmicas del material en [15] se da una expresión que nos permite establecer, teniendo la  $V$  un intervalo de valor da la velocidad de choque de la plancha volante.

$$V_{cmax} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{T_f C_B}{V_c}} \sqrt[4]{\frac{q C_e C_B}{\rho_s}} \quad (19)$$

donde:

$N$  - constante igual a 0,1

$C_B$  - velocidad del sonido en el aire 348 m/s a 27 de temperatura.

$s$  - espesor de la plancha volante

$T_f$  - temperatura de fusión del material volante

$q$  - termoconductividad del material volante

$C_e$  - calor específico

$\rho$  - densidad de la plancha

Las expresiones dadas se utilizan para determinar los parámetros fronterizos de la soldadura, en base a las cuales se seleccionan los parámetros tecnológicos de la soldadura a realizar.

En cuanto a la velocidad de choque se puede concluir diciendo que:

$$V_{min} < V_{crit} < V_{max} \quad (20)$$

En [5] se recomienda tomar la velocidad de choque según:

$$V_c = (1.1 - 1.3) V_{min} \quad (21)$$

Aunque se ha podido comprobar que aún no es suficiente esta velocidad de choque para obtener una buena deformación en la zona de contacto que implica una buena resistencia de la unión.

Gran cantidad de trabajos experimentales y teóricos se han hecho para encontrar una expresión aproximada por donde se pueda calcular el valor de la velocidad, con que la plancha comienza su vuelo por delante del chorro metálico que no es más que la velocidad de proyección de la plancha.

Para un índice de la adiabática  $K = 3$  se encontró en [5] que:

$$\frac{V_o}{D} = \frac{\sqrt{1 + 1,185 r - 1}}{\sqrt{1 + 1,185 r - 1}} \quad (22)$$

donde:  $V_o$  - velocidad de proyección de la plancha volante en fig. 2

$r = m_{se}/m_{pv}$

$m_{se}$  - masa de la sustancia explosiva.

$m_{pv}$  - masa de la plancha volante

También en [9] se dan estas fórmulas que computan para una misma velocidad de detonación, valor de  $h$  (espacio entre plancha) y una relación  $r$  dada, se puede tener una idea de que los valores no cambian sustancialmente. (tabla 1)

La expresión 23 fue obtenida de aumentar en un 20 % el valor de  $V_o$  obtenida por A. A Deribas después de múltiples experimentos teniendo en cuenta el impulso y la energía de la explosión en la plancha volante.

$$V_o = 1,2 D \frac{\sqrt{1 + 1,185 r - 1}}{\sqrt{1 + 1,185 r - 1}} \quad (23)$$

$$P(X_1 < X < X_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{X_2 - \alpha}{\sigma}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{X_1 - \alpha}{\sigma}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \Phi_2 \left( \frac{X_2 - \alpha}{\sigma} \right) - \Phi_1 \left( \frac{X_1 - \alpha}{\sigma} \right) \quad (27)$$

donde:  $\frac{X_1 - \alpha}{\sigma} = Z_1$ ;  $\frac{X_2 - \alpha}{\sigma} = Z_2$ ;  $\Phi(z)$  - Función normal tabulada

$a$  - mediana  
 $\sigma$  - desviación media

Los valores preferidos para los parámetros  $D$ ,  $r$ ,  $h$  están en los rangos siguientes  $D(X_1 = 2 \text{ 100}, X_2 = 2 \text{ 400})$  m/s,  $r(X_1 = 1 \text{ 0}, X_2 = 1 \text{ 3})$ ,  $h(X_1 = 6, X_2 = 8)$  mm.

Esto no quiere decir que cuando se vaya a soldar cualquier material tendremos que ajustarnos a estos parámetros, sencillamente es una expresión para orientar las condiciones de la soldadura. Por ejemplo estos parámetros no permiten la soldadura del plomo ya que para este:

$D = (1 \text{ 050} - 1 \text{ 300})$  m/s,  $r = 1$ . La velocidad sónica del plomo es muy baja 2 160 m/s.

En la solución de las ecuaciones no, lineales y no estacionarias bidimensionales de la dinámica de los gases

Teniendo en cuenta los valores de  $r$ ,  $K$  y  $D$  se propone también

$$V_o = \frac{r}{r+2} D \sqrt{\frac{3}{K^2 - 1}} \quad (24)$$

$$V_o = Dr \sqrt{\frac{3}{(K^2 - 1)(r^2 + 5r + 4)}} \quad (25)$$

Cuando  $\alpha = 0$  que las planchas se sitúen paralelas el ángulo en la Figura 2 se puede calcular como:

$$\beta = 2 \text{ arc sen} \left( \frac{V_o}{2D} \right)$$

y cuando se usa una sustancia mezclada de Amonita con sal amoniacal en una razón de 1:1 se ha demostrado que:

$$\beta = 0,99 r \left( r + 2,71 + \frac{0,184}{h} \right)$$

y conjugando estas dos últimas expresiones se puede llegar a la expresión de  $V_o$  como sigue

$$V_o = 2 D \text{ sen} \left( \frac{0,49 r}{r + 2,71 + \frac{0,184}{h}} \right) \quad (26)$$

Se puede observar que el parámetro  $h$  es muy influyente para obtener la velocidad con que la plancha se proyecta al encuentro con la plancha base, una muestra de eso lo vemos en la fórmula (26) que ya aparecen los tres parámetros más importantes para la soldadura involucrados en ella. La separación entre planchas debe ser tal que permita a la plancha volante alcanzar la máxima velocidad en el instante del choque.

Como resultado de numerosos experimentos se ha podido llegar a la conclusión acertada de que la probabilidad de obtener una buena estructura (buena resistencia, no formación de compuestos intermetálicos, no defectos, etc) en la soldadura por la expresión (27) [9].

se obtuvo la expresión que enlaza el ángulo de flexión dinámica de la plancha volante ( $\beta$ ), Figura 2 con la altura de la carga de la SE, así como la separación preliminar entre dichas planchas ( $h$ )

$$\beta = \left( \frac{\sqrt{K+1}}{\sqrt{K-1}} \right) - 1 \frac{\pi}{2} \frac{r}{r + 2,71 + \frac{0,184 H}{h}} \quad (28)$$

Durante estos se puede calcular  $V_o$  según la expresión (29) para planchas que sueldan según el esquema en paralelo:

$$V_o = 2 D \text{ sen}(\beta/2) \quad (29)$$

Una fórmula análoga a (28) fue obtenida en [2]

$$\beta = \frac{1}{3} r^{0,5} \left( \frac{h}{H} \right)^{1/3} \quad (30)$$

Aunque hemos tratado ecuaciones matemáticas teóricas podemos asegurar que en la práctica ellas nos ayudan a predecir los parámetros fundamentales desde el punto de

vista tecnológico, que necesitamos para obtener una unión soldada con la energía de explosión. De manera que en

estas condiciones puede plantearse que  $D$ ,  $r$ , y  $h$  son los parámetros que fijan el proceso de soldadura.

### Sustancias explosivas para soldar

Las sustancias explosivas para la unión metalúrgica de planchas de materiales ferrosos y no ferrosos deben cumplir una serie de requisitos.

De acuerdo con la teoría hidrodinámica de la explosión se puede simplificar la onda de detonación en tres partes fundamentales; onda de choque, zona de reacción química y zona de los productos finales de la detonación.

Un régimen estable de la detonación es asegurado sólo si se cumple la condición de Chapman-Jouget; la presión  $P$ , la velocidad másica  $V_m$  y la densidad de los gases son parámetros de la onda de detonación que con esta condición pueden ser calculadas con las ecuaciones básicas de la dinámica de los gases [2].

$$P = \frac{\rho D^2}{K+1}; V_m = \frac{D}{K+1}; \rho = \frac{\rho_o (K+1)}{K}$$

También en [2] se plantea que para todo el intervalo de densidad de la sustancia explosiva se puede usar la ecuación de la adiabática  $PV^K = \text{cte}$  tomando un  $k = 3$ . Esto determina que el parámetro fundamental que debe caracterizar las SE para soldar es su velocidad de detonación  $D$ .

Esta velocidad depende de la naturaleza de la sustancia, composición, densidad, dimensiones de la carga (geometría), magnitud de la partícula y de su envoltura que en este caso no lo tendremos en cuenta.

De la velocidad de detonación aparece en casi todas las investigaciones y bibliografías su estudio en cargas esféricas o cilíndricas y casi nadie ha estudiado como se comporta en cargas planas, de poco espesor y uniformemente distribuida en un área determinada.

Según los experimentos realizados y coincidiendo con la mayoría de los autores que se refieren al proceso de soldadura, la velocidad de detonación de estas sustancias debe estar en un rango de 1 500 m/s hasta la velocidad del sonido en el metal a soldar. Sin embargo se ha podido comprobar que sustancia explosiva como la Amonita (21 % de TEN y 79 % de Nitrato de Amonio) con  $k = 2,5$  en estado puro industrial es muy fuerte para soldar los metales tales como titanio técnico, cobre, aluminio, aceros inoxidable, etc, que tienen una velocidad sónica entre 4 500 y 6 000 m/s; de manera que es necesario, más que por un problema económico por un problema tecnológico, disminuir esa velocidad  $D$ , para esto es necesario mezclar las SE industriales que se usan normalmente en el Ministerio de la Construcción, con una sustancia inerte que absorba calor de la explosión y con ello disminuir la  $D$ , esas sustancias pueden ser NaCl, KCl, etc; además aunque el nitrato de amonio al 34 % no es inerte sirva para disminuir  $D$  y ayuda a buscar la masa necesaria para la soldadura.

Las dimensiones de la carga es fundamental para evaluar la  $D$ ; para soldar planchas se sitúa la carga encima de toda el área de estas. Tomando su espesor  $H$  y un ancho  $b$  en el caso de la Amonita se ha dibujado una curva (Figura 3) que representa cómo variar la velocidad  $D$  en función

de la relación  $b/H$  para dos espesores de la carga ( $h$ ), según [9].

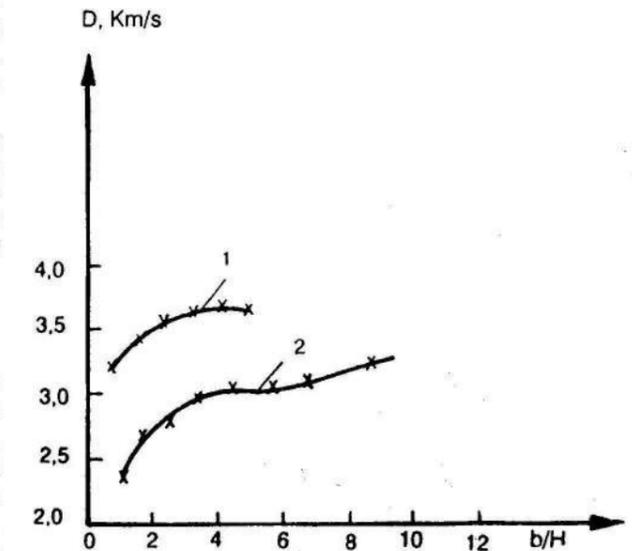


FIGURA 3. Velocidad de detonación de la Amonita 6.2CB en función de  $b/H$ . 1- $H=20$ , 2- $H=10$ ,  $H$ (mm)

También con fines prácticos se da una caracterización de la velocidad  $D$  de la mezcla de Amonita con nitrato de amonio en % (Figura 4) y con NaCl (sal común) (Figura 5) en función de su espesor  $H$  (mm).

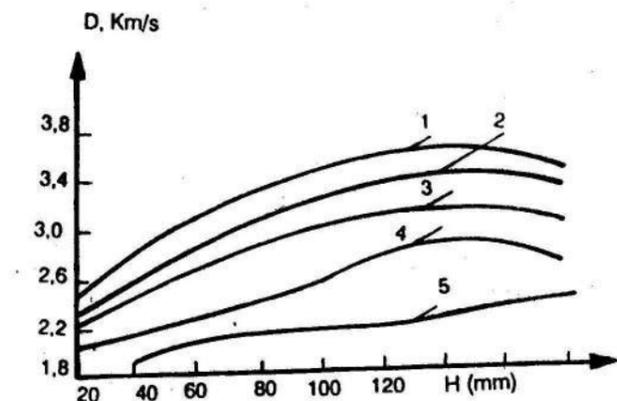


FIGURA 4. Variación de  $D$  con el espesor  $H$  para una mezcla de amonita 6.2CB con salitre amoniacal, % 1-50, 2-40 3-33, 4-30, 5-25

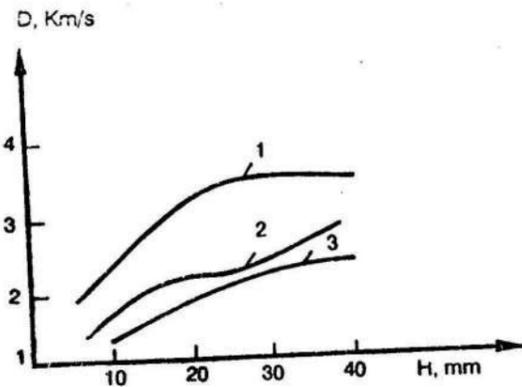


FIGURA 5. Variación de D con el espesor H para una mezcla de Amonita 6.7CB con NaCl, %  
1-20, 2-40, 3-50

En este caso se ha trabajado con una dependencia empírica para la obtención aproximada de la velocidad de detonación de la Amonita en función de su espesor.

$$D = 4.500 \cdot 1 - \frac{2.44}{H^{0.78}} \cdot m/s; H(mm)$$

Así como para una mezcla de Amonita con sal común

$$D = \frac{43.500}{1.012^x} \left( 1 - \frac{2.44 (1 - 0.0272x^{0.776})}{H^{0.78}(1.005)^{-x}} \right)$$

donde:

x - por ciento de sal en peso.

De manera que se puede decir que las SE para soldar deben ser capaces de controlar su velocidad de detonación, en cargas planas y de poco espesor deben asegurar una detonación estable, deben ser manipulables, baratas y conservar sus propiedades en el curso de determinado tiempo.

### Otros aspectos

Los materiales compuestos, obtenidos por medio de la soldadura por explosivos, tienen variados usos; de su uso específico depende en gran medida el valor de su resistencia mínima al deslizamiento, que es la prueba principal que se hace a los materiales bimetálicos, de manera que, cuando se necesite una alta resistencia una condición indispensable a tener en cuenta desde el punto de vista práctico es la elección cuidadosa de los parámetros de soldadura, así como la limpieza en los casos que van a ser soldados y la rugosidad superficial entre ellos.

Se ha podido comprobar que una limpieza química en las superficies de los metales no ferrosos (Al, Cu, Pb, Ti) es suficiente para obtener la resistencia mínima, sin embargo cuando la plancha base es de acero al carbono podemos eliminar las capas de óxido que se forman con un disco abrasivo o una muela que dar un R entre 15 - 20 micrones.

Es por eso que para garantizar una resistencia mínima según las normativas de los diferentes países (140 MPa) las superficies tienen que estar exentas de todo tipo de grasa, óxido u otra suciedad.

Algunos autores plantean que el choque metálico que se produce dentro del ángulo de impacto es capaz de limpiar las capas de óxido que se producen en las planchas de acero al carbono pero se ha comprobado que quizás esto sea cierto para los metales no ferrosos pero no así para el acero al carbono.

Otro aspecto es la deformación que se produce en las planchas después de la explosión, esta depende de cómo se sitúe el detonador en el borde de la sustancia explosiva, el tipo de yunque y el espesor de la plancha base.

Si se coloca el detonador en un ángulo de la carga, las planchas soldadas tendrán una deformación en dos planos diferentes según muestran la Figura 6 a) y si se coloca el detonador en el centro del borde que determina el ancho de la plancha obtendrá una deformación en una sola dirección, Figura 6 b).

En cuanto al yunque que se pone para basificar el proceso su influencia es notable en la deformación del

semiproducto terminado; investigadores han propuesto como un yunque que da buenos resultados a un banco de arena húmeda compactada también con explosivos, sin embargo es el que más deformación permite en el semiproducto, en otros casos se han hecho experimentos en un yunque de acero de gran espesor, y aunque hay que tener mucho cuidado con el fenómeno de la reflexión y refracción de las ondas de choque con la destrucción de los enlaces producidos, es el que menos deformación provoca.

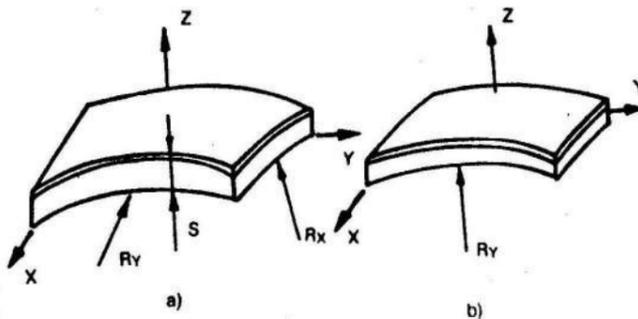


FIGURA 6. Placas después de soldadas.  
a) Detonador en una esquina  
b) Detonador en el centro.

Es importante elegir correctamente el yunque en función de la dureza de los materiales, ya que en la unión del Al con el Cu un yunque de acero produce un aplastamiento notable en el espesor de las planchas que no se ve cuando se hace en el de arena.

El espesor de las planchas también influye en la deformación del semiproducto en el sentido de que para bajo espesor de planchas volantes deformarán menos que en espesores ya que estos influyen directamente en el valor de la carga que se necesita para obtener una unión resistente.

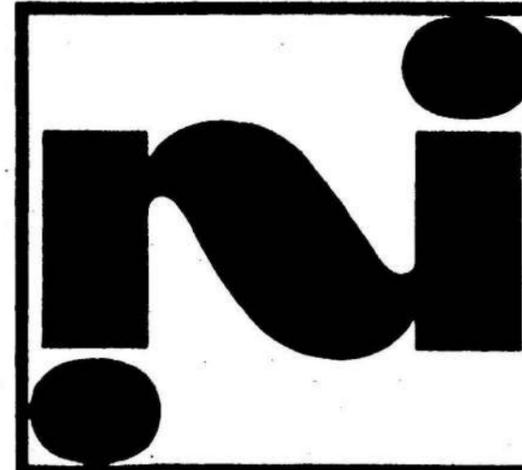
### CONCLUSIONES

1. La velocidad de detonación de las sustancias explosivas deben ser menores que la menor velocidad sónica de los metales a soldarse y en general se encuentran por encima de 1 500 m/s; aunque los mejores resultados se encuentran entre 2 100 y 2 400 m/s.
2. La relación r puede estar entre 1 y 3 aunque los mejores resultados se han obtenido para r entre 1 y 1.5.
3. El espacio entre plancha (h) es aproximadamente el doble del espesor de la plancha volante cuando los espesores son mayores que 0 y menores que 5 mm, pero en general pueden estar entre 6 y 8 mm.
4. Las sustancias explosivas para soldar deben garantizar una buena estabilidad en grandes áreas y pocos espesores, ser baratas y de buena manipulación y en general pulverizantes.

### REFERENCIAS

1. BAUM, F.A. y otros: Física de la explosión. M., Ciencia, 704 p, 1975.
2. BELIAVEV, V.I. y otros: Deformación a alta velocidad de los metales. Mink, Ciencia y Técnica, 222 p, 1978.
3. CARPENTER, S.: Soldadura de metales por explosión. Mink, Biolorua, 42 p, 1978.
4. COWAN, G.R.; O.P. BERGMAN and A.H. HOLZMAN: Metallurgical Transaction, Vol. 2, No. 11, 3144-3155, 1971.
5. DERIBAS, A.A.: Física de la consolidación y la soldadura por explosión. Novosibirsk, Ciencia, 190 p, 1972.
6. DERIBAS, A.A. e I.D. ZAJARENKO: Determinación de los regímenes límites que aseguran la soldadura por explosión. FBG, T.11 No. 1, 151-153, 1975.
7. KARAKOSOV, E.S.: Uniones de los metales en fase sólida. Metalurgia, 264 p, 1976.
8. KELLER, K.: Beitrage zum Explosivplattieren. j. Messung der plattiergeschwindigkeit. Z. Metalkunde. 298-305, 1968.
9. KONON, A. Yu.: Soldadura por explosión. Moscú, 216 p, 1987.
10. KUDINOV, V.M. y A. KOROTEEV: Soldadura por explosión en metalurgia. 165 p, 1978.
11. RAYJART, D. y D. PIRSON: Comportamiento de los metales ante cargas impulsivas. M., Tomo II, 287 p, 1958.
12. SEIJ, B.C.: Soldadura por explosión como forma del proceso de unión de los metales en fase sólida. Volgograd, 1974.
13. SEIJ B. C. y otros: Soldadura por explosión. Experiencias destacadas. Tema 4. GOSINTI, 13 p, 1962.
14. WALCH, T.; R. SHREFLER and E. WILLING: J. of Appl. Phys, 24 No. 3, 349 p, 1953.
15. WITTMAN, R.H.: Proc. Int. Symp. Use of explosive energy mgf metallic material. Mariánskelazne, Checoslovaquia, 153-198, 1973.

¡PONGASE EN CONTACTO CON CUBANÍQUEL!



MÁS NÍQUEL  
MÁS CERCA  
DE USTED



7-8460



CUBANÍQUEL



P. O. BOX  
6128

©Reina Conchán  
Calle 88 No. 88. Vedado.  
La Habana, Cuba.