



XIX International Conference on Extractive Metallurgy

*“Recent Developments in Metallurgy,
Materials and Environment”*



PAPER 33

EFECTO DE PARÁMETROS DE PROCESO DE SOLDADURA LASER EN LAS PROPIEDADES DE CORDÓN DE COMPUESTOS AVANZADOS DE MATRIZ METÁLICA Al/Gr

*E Aguilar-Cortés¹, M Pech-Canul², J Acevedo-Dávila¹,
M Garza-Castañón¹, W. Hung³.*

1. CORPORACION MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES S.A. DE C.V.
2. CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN UNIDAD SALTILLO
3. TEXAS A&M UNIVERSITY COLLEGE

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO
MAY 18-21, 2010

EFECTO DE PARÁMETROS DE PROCESO DE SOLDADURA LASER EN LAS PROPIEDADES DE CORDÓN DE COMPUESTOS AVANZADOS DE MATRIZ METÁLICA Al/Gr

E AGUILAR-CORTÉS¹, M PECH-CANUL², J ACEVEDO-DÁVILA¹, M GARZA-CASTAÑON¹, W. HUNG³.

1. Corporacion Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V., Ciencia y Tecnología 790, Col. Saltillo 400, C.P. 25290 Saltillo, Coah., México. 2. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN unidad Saltillo, Carretera a Monterrey 25900, Ramos Arizpe, Coah., México. 3. Texas A&M University, 106 Farmer Hall, 3367 TAMU, College Station, Tex.77843, USA.
edgaraguilar@comimsa.com

ABSTRACT

The aim of this paper is to analyze the behavior of advanced aluminum graphite composites (Al/Gr – MMCs) joined by Nd: YAG, in order to determine the viability of the process for industrial applications. The study was carried out by analyzing the effect of power density (I), pulse duration (t), frequency (F) and welding speed (s) on the depth of penetration, bead width, undesirable phases (Al_4C_3) and the number of defects. It was determined that (I) has the greatest influence on the penetration, with a maximum value of 1.5 mm, for (I) of $250 \times 10^4 W/cm^2$. (t), (F) and (s), was determined that little affect penetration. However, these factors have great influence on the formation of undesirable Al_4C_3 phase, whose proportion increases with (t) and (s) decreases. Respect of defects found, the largest was the presence of constrictions followed by porosity, caused by low wettability between aluminum and graphite and the high viscosity of the molten material.

Keywords: *MMCs, Graphite fibers, Laser welding, Constrictions.*

RESUMEN

Este trabajo analiza el comportamiento de un compuesto de matriz de aluminio reforzados con fibras de grafito (CMMs - Al/Gr), unido mediante soldadura laser pulsada de Nd:YAG, a fin de determinar la viabilidad del proceso para aplicaciones industriales. Se llevo a cabo analizando el efecto de la densidad de potencia (I), duración de pulso (t), frecuencia (F) y velocidad de avance (s), sobre; la geometría del cordón, la fase indeseable Al_4C_3 y la cantidad de defectos. Se determino que (I) tiene la mayor influencia sobre la penetración, con un valor máximo de 1.5 mm, para una I de $250 \times 10^4 W/cm^2$. Respecto a t, F y s, se observó que poco afectan la penetración, por otra parte se vio que, tienen influencia en la formación de Al_4C_3 , cuya proporción aumenta conforme t aumenta y s disminuye. Respecto a los defectos, el mayor fue la presencia de constricciones seguido de porosidad, producto de la baja mojabilidad entre el aluminio y el grafito y la alta viscosidad del material fundido respectivamente.

I. INTRODUCCIÓN

Con el transcurso de los años, los circuitos integrados (CI's) han migrado a tamaños más pequeños con mejores características, permitiendo que mayor cantidad de circuitos sean empaquetados en cada chip. Esta tendencia se espera que continúe, y que para el año 2011 el tamaño nominal de los transistores utilizados en CI's sea de aproximadamente 22nm. Sin embargo, una desventaja de lo anterior es la pérdida de rendimiento y posible destrucción del CI, debido a las cargas térmicas extremas, producto del calor generado por fricción electrónica, difícil de disipar [1]. Ver Figura 1.

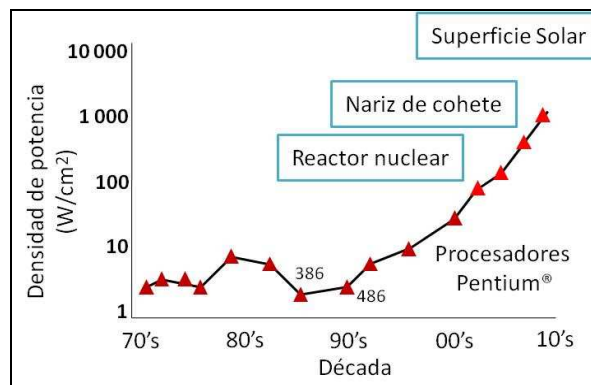


Figura 1. Proyección del incremento de densidad de calor, producido por los componentes electrónicos dentro de CI's, el cual podría no ser removido por ningún sistema de disipación conocido. Mardinly J. 2007.

De lo anterior y con el fin de maximizar la transferencia de calor y minimizar la distorsión térmica, actualmente se recurre a técnicas de termocontrol, utilizando "Compuestos Avanzados de Matriz Metálica" (CMM's), de los cuales los CMM hechos a base de aluminio, reforzado con fibras de grafito, han dado muestras de tener mejor desempeño en cuanto a propiedades térmicas y mecánicas, comparándolos con otros materiales utilizados para el mismo fin. [2 - 4]

Sin embargo, la desventaja principal que presenta esta clase de material es la escasa información respecto al comportamiento del mismo, durante y después de la aplicación de soldadura,

Por lo anterior, este trabajo tiene como fin, evaluar el efecto de los parámetros de proceso sobre las propiedades microestructurales del CMM Al/Gr, Al METGRAF 7-200 soldado mediante Láser pulsado de Nd:YAG, con la intención de encontrar las condiciones adecuadas que permitan lograr una unión sana que degrade en lo mínimo las propiedades térmicas y mecánicas del compuesto.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se llevo a cabo una investigación del efecto de los parámetros de soldadura (Densidad de potencia, Energía, Duración de pulso, Frecuencia y Velocidad de avance), sobre las características microestructurales de un CMM con la especificación Al-MetGraf 7-200, soldado con laser pulsado de Nd:YAG a diferentes niveles.

II.1 Material

El material utilizado en este estudio fue el compuesto de matriz metálica reforzado con fibras de grafito Al-MetGraf 7-200. El refuerzo se compone de fibras de grafito con una proporción del 30% del volumen del compuesto. El diámetro promedio de fibras a partir de 11 mediciones fue de 11.7 μm con una desviación estándar de 2.7 y una varianza de la muestra de 7.3, así como, un diámetro promedio de 300 μm . Ver Figura 2.

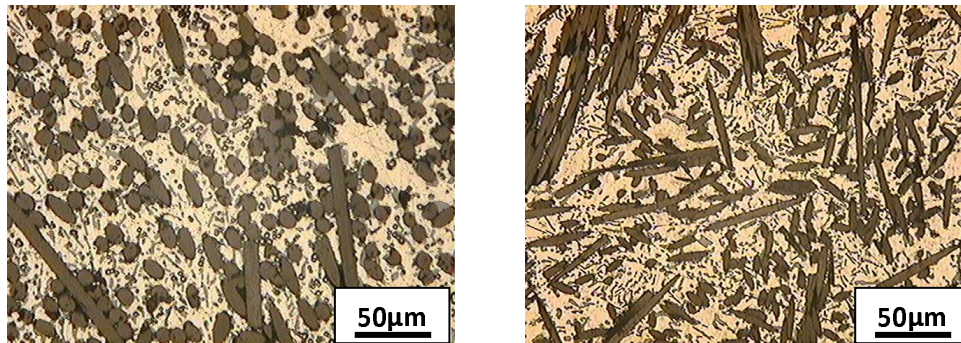


Figura 2. Inspección al compuesto de matriz de aluminio reforzado con 30% en volumen de grafito. De izquierda a derecha. A) Micrografía normal a la superficie de montaje (plano z). B) Micrografía paralela a la superficie de montaje (plano xy)

Se constato por medio de laboratorio que la matriz corresponde a una aleación eutéctica de aluminio silicio A413 modificada con más magnesio, con una dureza aproximada de 60 – 80 Rockwell E. Ver Tabla I.

Tabla I Análisis químico de la matriz del compuesto y propiedades físicas importantes.

Al	Sn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Zn	Ni
BAL.	0.15%	0.36%	1.0%	0.35%	2.0%	11.0-13.0%	0.50%	0.50%
Conductividad Térmica (W/mK): Plano xy: 185-200 Espesor z: 125								
Cp (J/gK): 0.879								
CTE (Avg. 20°C to 150°C ppm/C): Plano xy: 7 Espesor z: 24								
Resistencia a la tensión (ksi): Plano xy: 13.5 Espesor z: 5.5								

II.2 Diseño experimental

Para la experimentación se utilizaron modelos factoriales completos 2k y 3k, con 2k -1 y 3k -1 grados de libertad. El motivo por el cual se selecciono este tipo de diseño, fue por que, cubre todas las posibles combinaciones de los

niveles de cada factor, así como, muestran mejor las interacciones que se presentan entre variables. Ver Tabla II.

Tabla II. Parámetros utilizados durante el estudio.

Variables Independientes		Niveles		
I	Densidad de potencia	1.2 MW/cm ²	1.3 MW/cm ²	1.45 MW/cm ²
Pp	Potencia pico	3600 W	3900 W	4350 W
t	Duración de pulso	2.5 ms	3.5 ms	4.5 ms
s	Velocidad de avance	0.5 mm/s	1.5 mm/s	2.5 mm/s

Para el estudio del efecto de los parámetros de soldadura laser Nd:YAG sobre la soldabilidad del material, se fijaron los valores de frecuencia, flujo del gas de protección y distancia focal. Para la experimentación se utilizaron placas de 25.4 X 12.7 X 3 mm. Ver figura 3.

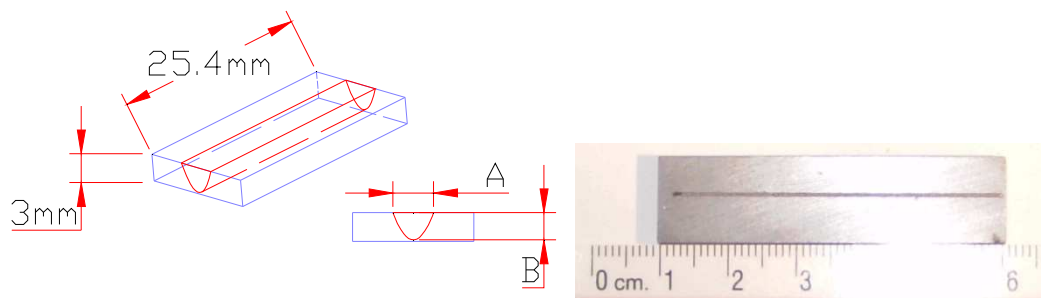


Figura 3. Representación de la probeta y el corte transversal del cordón para inspección metalográfica.

Antes de proceder con la aplicación de soldadura, cada placa fue primero pulida en seco mediante lija grado 1200, después se limpiaron con alcohol mediante ultrasonido durante 10 minutos en una maquina Branson 5520, con el fin de evitar la inclusión de óxidos. Finalmente se utilizo aire caliente para secar las probetas y no se dejo pasar más de media hora para la aplicación del laser.

Después de la limpieza, durante las corridas de soldadura, el gas de protección fue Argón de alta pureza sin la utilización de aporte con el fin de aprovechar la ventaja del proceso laser de poder soldar únicamente fundiendo el metal base.

La maquina utilizada en este estudio fue un modelo BU 160 Nd:YAG pulsado con potencia pico máxima de 7500W (Ppmax).

III. RESULTADOS

III.1 Influencia del desenfoque sobre la geometría del cordón

Al inicio del estudio se opto por fijar la escala de enfoque, ya que como se vio en la bibliografía consultada, el desenfoque tiene gran influencia respecto a la profundidad y ancho del cordón. [4]

El comportamiento sobre la profundidad y ancho del punto de incidencia mostrado en la Figura 4 estuvo en concordancia con la literatura, verificando que conforme la distancia focal se modifica, también se cambia el tamaño del punto, lo cual a su vez, modifica la densidad de potencia con el consecuente cambio en la penetración. Así, el desenfoque se fijo a 1mm debajo del plano focal, ya que a este valor se maximiza la penetración y se minimiza el ancho.

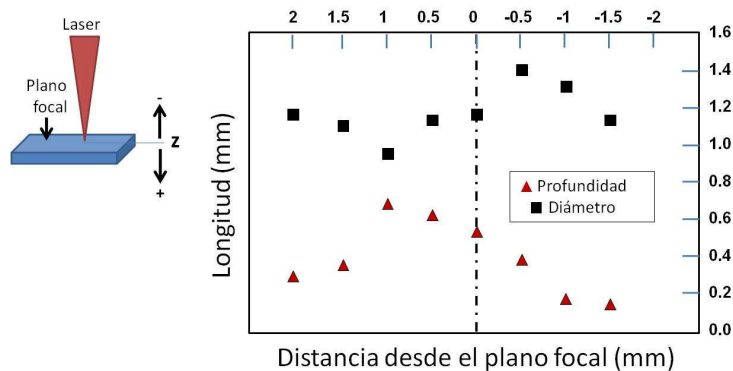


Figura 4 Efecto del desenfoque del haz sobre la profundidad y diámetro del punto de incidencia utilizando $P_p = 4125 \text{ W}$; $F = 20 \text{ Hz}$; $t = 2 \text{ ms}$; $s = 300 \text{ mm/min}$.

III.2 Influencia de los parámetros sobre la profundidad del cordón

Después de fijar la distancia focal el análisis del primer diseño de experimentos mostro claramente que la variable que mas afecta la profundidad de penetración en el CMM de Al/Gr es la potencia pico (es decir la energía/duración de pulso), como muestra la Figuras 5 y 6.

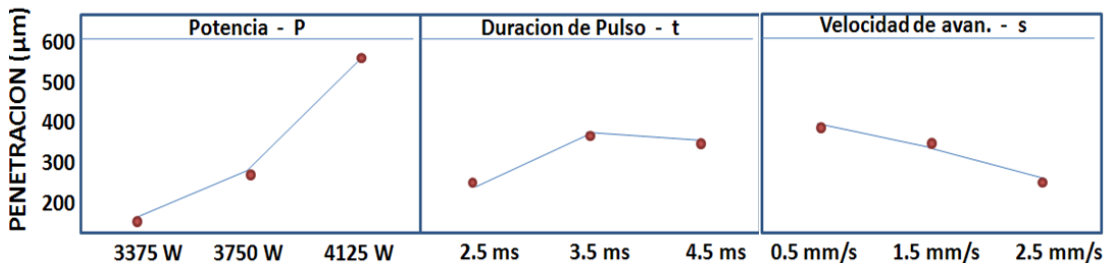


Figura 5 Efecto de los parámetros de soldadura con respecto a la penetración, utilizando tres niveles de entrada.

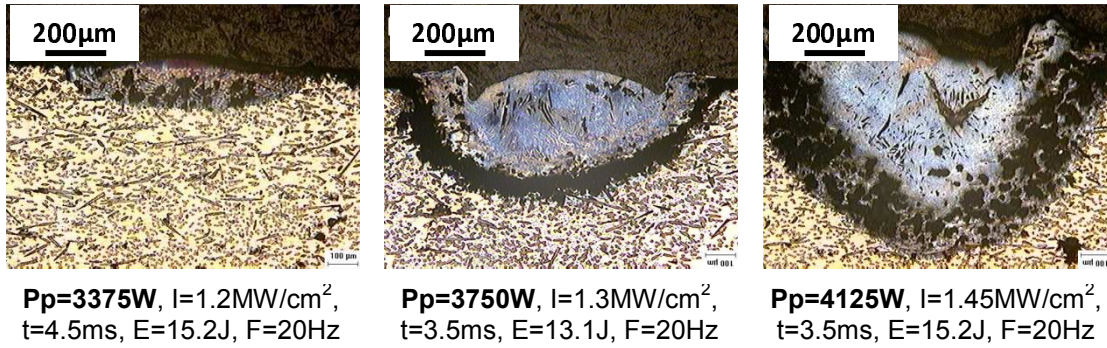


Figura 6. Efecto de los parámetros de soldadura sobre la profundidad y ancho del cordón.

III.2 Influencia de los parámetros sobre el ancho del cordón

Por otra parte, en cuanto al ancho del cordón se vio que no solamente la potencia tiene injerencia en esta geometría si no también una variable con mucha influencia es la duración de pulso, como se muestra en el análisis de la Figura 7. Los resultados analizados en cuanto al ancho del cordón mostraron también que conforme aumenta la duración de pulso este también aumenta con el consiguiente incremento de zona afectada por el calor, lo cual se ve mas claramente en la Figura 8, además, este análisis corrobora la bibliografía encontrada. [5]

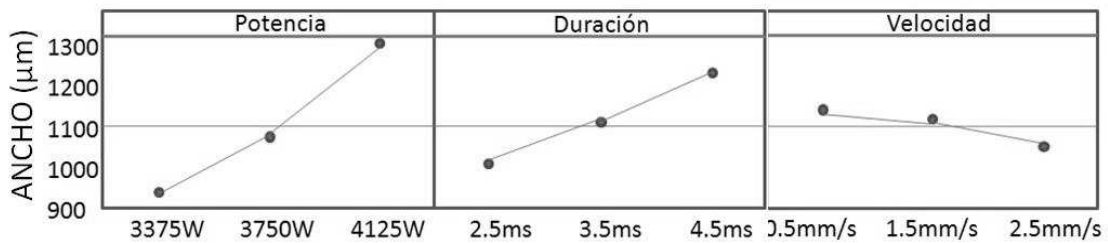


Figura 7. Efecto de las variables de entrada con respecto al ancho del cordón utilizando diferentes niveles de entrada.

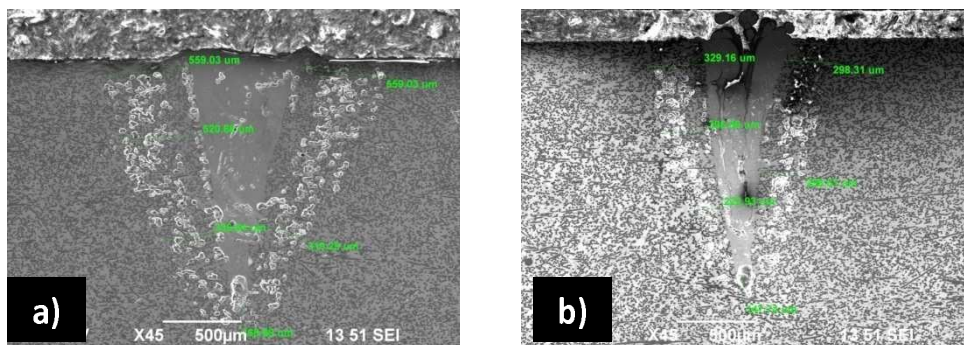


Figura 8. Efecto de las variables de entrada con respecto al ancho del cordón utilizando diferentes niveles de entrada. a) P = 4500W, t = 4ms; b) P = 4500W, t = 8ms.

III.4 Influencia de los parámetros sobre el nivel de constricciones.

Después de realizar el diseño experimental, el análisis mostro la dependencia que tiene la banda de constricciones formada en el contorno de la zona de fusión con respecto a los parámetros de soldadura. El análisis mostro que la potencia y las interacciones entre las variables dependientes del tiempo (duración de pulso, frecuencia y velocidad de soldadura), son las responsables de la formación de constricciones en la matriz, lo cual será explicado en la sección de discusión. Figuras 9 y 10.

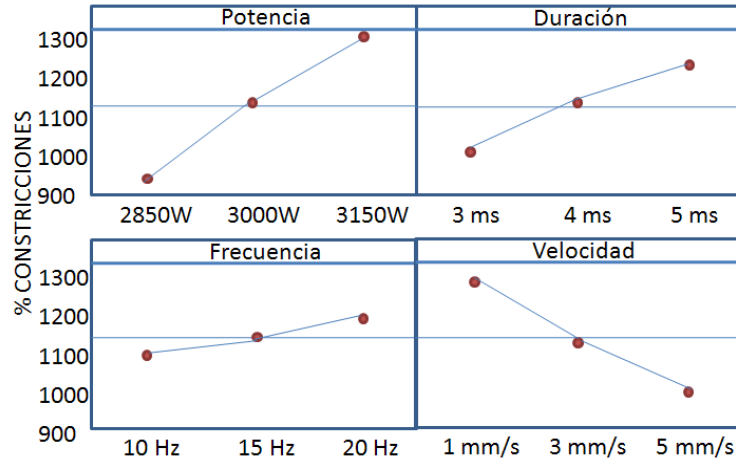


Figura 9. Efecto de las variables de entrada con respecto al nivel de constricciones encontrado en un área de $10000\mu\text{m}^2$ utilizando diferentes niveles de entrada.

III.5 Influencia de los parámetros sobre el nivel de microdureza del cordón.

La dureza del material y de las soldaduras se evaluó de acuerdo a la especificación ASTM C1671 – 07 utilizando un microdurómetro Future Tech®, y una carga de 200gr. La inspección se realizó a 6 probetas del primer diseño de experimentos. Ver Figura 11.

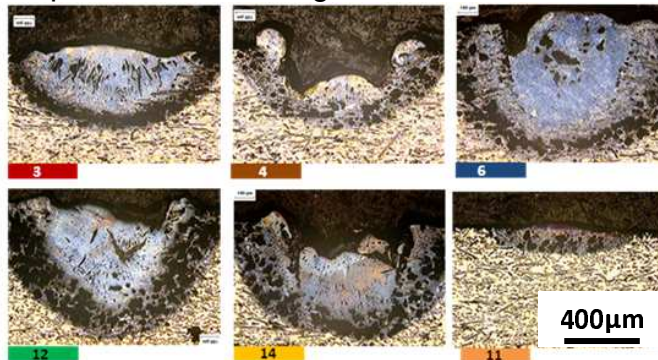
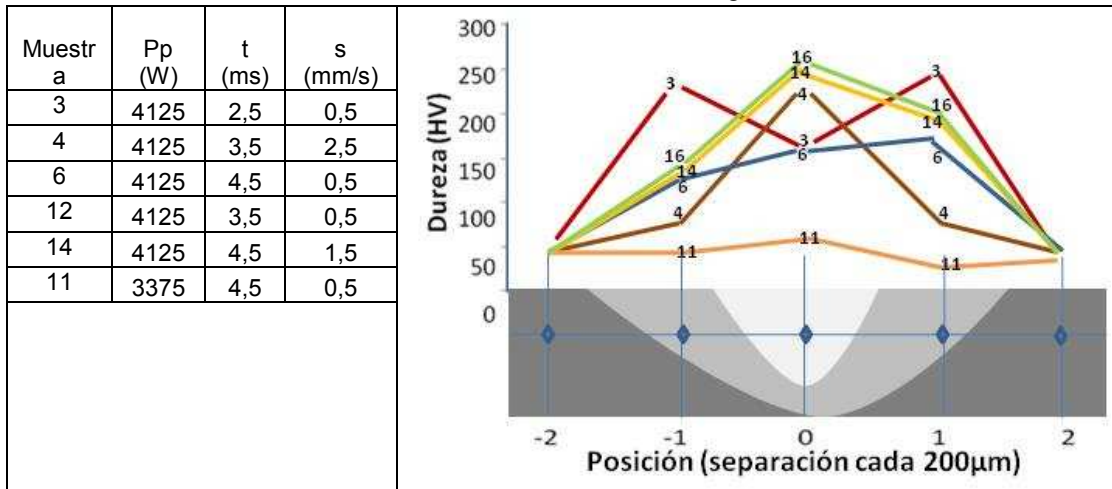


Figura 11. Probetas analizadas para el perfil de dureza

Los niveles de entrada utilizados para el análisis de dureza, así como el perfil, se muestran en la Tabla III

Tabla III Análisis de datos sobre el diámetro del refuerzo de grafito utilizando 11 mediciones



IV. DISCUSIÓN

IV.1 Microestructura general del cordón soldado por laser de Nd:YAG

La Microestructura encontrada a lo largo de la experimentación mostró cuatro regiones típicas, como puede verse en la figura 12.

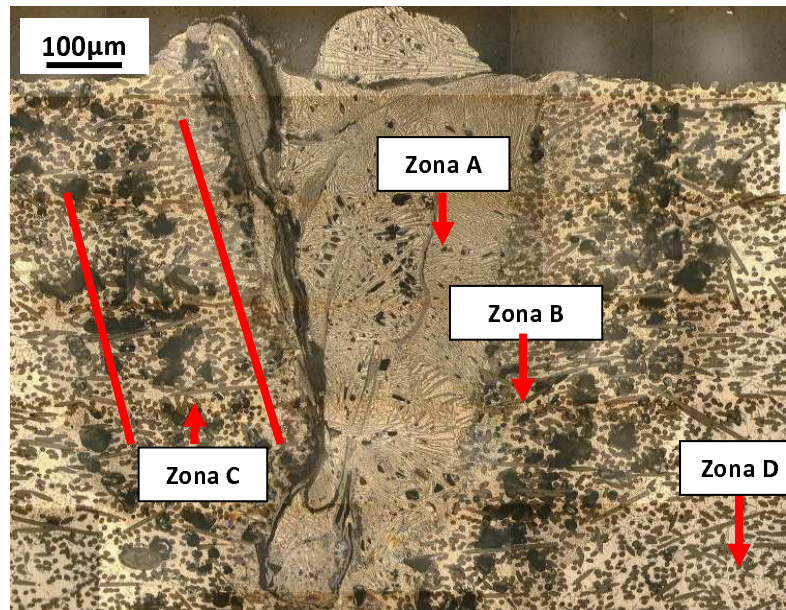


Figura 12. Microestructura típica de soldadura laser Nd:YAG pulsado en CMM Al/Gr.

La primera región de la Figura 12 corresponde a la zona central del cordón identificada como A, cuyas características generales corresponden a una estructura dúplex de precipitados en forma de aguja y de placas finas de color mas claro. Junto a la región A, se encontró una zona estrecha de fusión identificada como B. Por otra parte junto a la zona de fusión se encontró una zona afectada por el calor marcada como C donde se encontró

principalmente una banda de huecos o constricciones de la matriz y fibras de grafito.

IV.2 Dependencia de la geometría respecto de los parámetros.

En cuanto a la geometría del cordón se observó que la profundidad esta directamente ligada a la potencia y poco depende de los demás parámetros como muestra la figura 13.

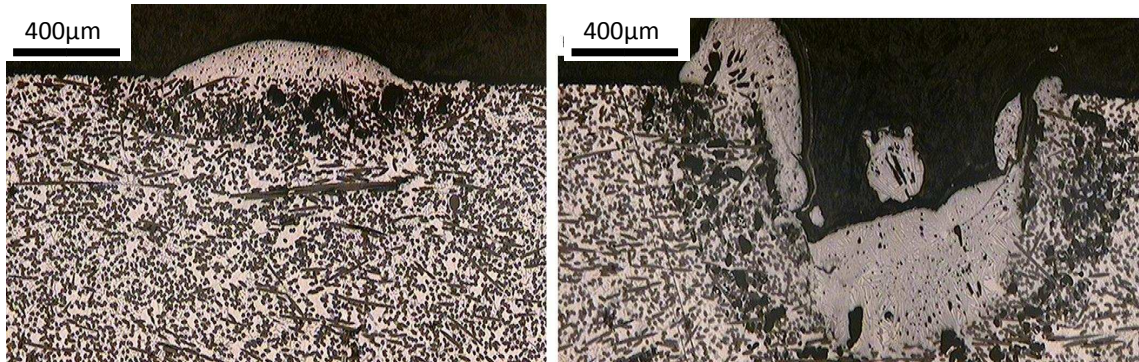


Figura 13. Dependencia de la densidad de potencia con respecto a la profundidad de penetración. (a) $I = 1.4 \text{ MW/cm}^2$, $t = 6\text{ms}$, $F = 20\text{Hz}$, $s=1\text{mm/s}$. (b) $I = 1.6 \text{ MW/cm}^2$, $t = 6\text{ms}$, $F = 10\text{Hz}$, $s=1\text{mm/s}$

Así quedo determinado que la variable que mas afecta la penetración en el CMM de Al/Gr es la potencia pico (es decir la energía/duración de pulso), como muestra la Figura 13. Por otra parte, respecto al ancho del cordón se observo que además de depender de la potencia también tiene una fuerte dependencia de la duración de pulso y de la distancia focal que incrementa o disminuye la densidad de potencia. Los resultados analizados en cuanto al ancho del cordón mostraron también que conforme aumenta la duración de pulso también aumenta la zona afectada por el calor.

IV.3 Dependencia de la microestructura respecto de los parámetros

Se encontró que el uso del proceso láser a bajas energías de entrada y ciclos térmicos cortos limitan la disolución del refuerzo de Grafito con la subsiguiente formación de una fase perjudicial de carburo de aluminio (Al_4C_3). De hecho, únicamente una pequeña región de $\text{Al}_4\text{C}_3 + \text{Si}$ + una estructura celular eutéctica dendrítica fue encontrada en el centro de la zona de fusión cuando se emplean bajas densidades potencia, como muestra la figura 14.

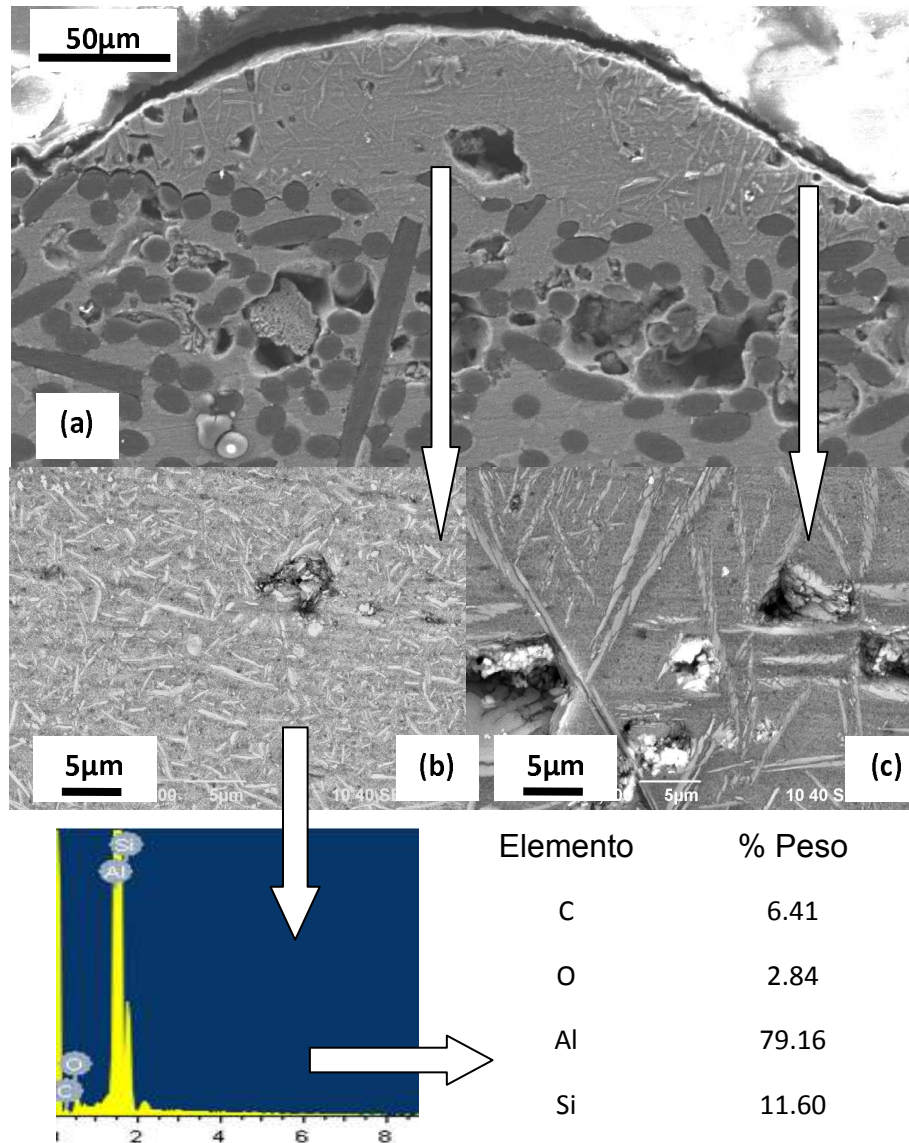


Figura 14. Disminución en la formación de Al_4C_3 conforme la densidad de potencia disminuye. (a) Vista general a 350X utilizando: $I = 1 \text{ MW/cm}^2$, $t = 5 \text{ ms}$, $F = 20 \text{ Hz}$, $s = 3 \text{ mm/s}$. (b) Zona central de soldadura en forma de estructura eutéctica dendrítica. (c) Zona exterior con trazas de Al_4C_3

La anterior estructura de solidificación fue rodeada primero por una banda estrecha de Grafito + Al_4C_3 + estructura de solidificación eutéctica, y finalmente por una región mas grande de Fibras de grafito + estructura de solidificación eutéctica + una región de huecos o constricciones de la matriz. También se encontró que el área de las regiones antes descritas disminuía conforme la densidad de potencia disminuía también y que el área de zona de constricciones disminuía también conforme la energía de entrada era menor. Lo anterior puede verse en la figura 15 donde en (a) la zona de constricciones es mayor que en (b) debido a que en la primera la energía por pulso fue de 19.2J a 20Hz y en (b) fue de 28.8J pero a 10Hz. Lo que corresponde a una potencia promedio de 384W y 288W respectivamente.

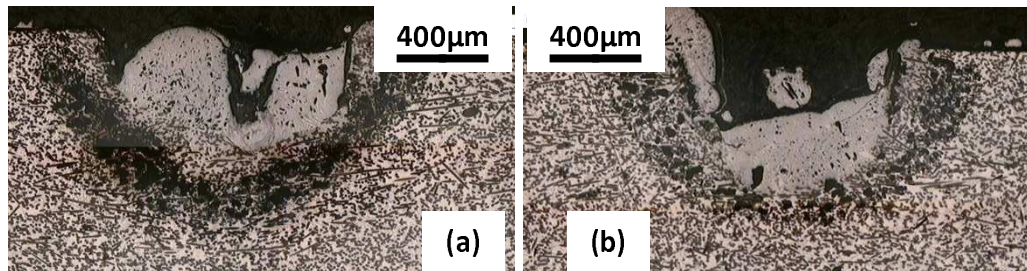
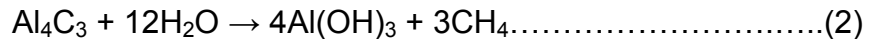


Figura 15. Disminucion de la zona de constricciones debido al cambio en la energia de entrada, duracion de pulso y frecuencia. (a) $E = 19.2\text{J}$, $t = 4\text{ms}$, $F = 20\text{Hz}$ y (b) $E = 28.8\text{J}$, $t = 6\text{ms}$, $F = 10\text{Hz}$. Ambas soldaduras utilizando $I = 1.6\text{ MW/cm}^2$, $s=1\text{mm/s}$.

Se observo que la reacción del aluminio líquido con las fibras de Grafito (C) forma el carburo Al_4C_3 . Además se indica también un producto adicional de silicio primario. Esto en base a lo reportado por Yue e Isaki que muestran que la energía libre de Gibbs (ΔG) de la reacción (1) se hace cada vez mas negativa por encima de $730\text{ }^\circ\text{C}$, indicando la formación de las fases producto.



El efecto nocivo de esta fase en los CMMs con matriz de aluminio es que en contacto con agua estos carburos forman el óxido o el hidróxido del elemento y el hidrocarburo (metano, acetileno o propadieno) correspondiente. Lo cual en algunos casos corroe el material circundante, como se muestra en la ecuación (2).



IV.4 Análisis de defectos

Durante la solidificación, en la zona central y la de fusión, se encontró como defectos prominentes grietas y poros cuando el compuesto Al-MetGraf-7200 es soldado con laser de Nd:YAG en modo pulsado. La porosidad en la zona A y B es debida a la alta viscosidad del compuesto fundido cuando la duración de pulso es demasiado corta lo cual no permite a las burbujas de gas escapar fácilmente. Ver Figura 16.

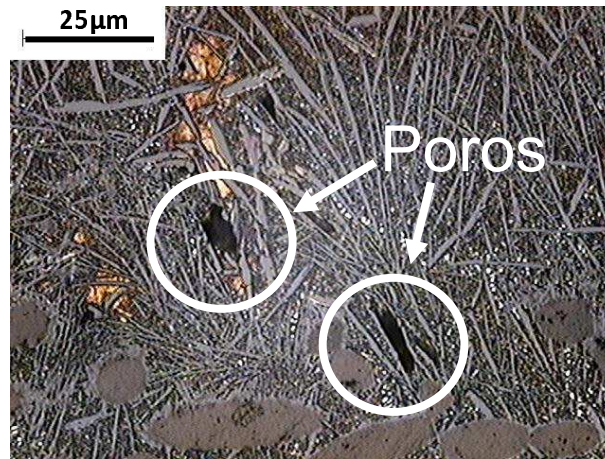


Figura 16. Porosidad encontrada en la zona de fusión (región B) cuando $P_p = 4125W$, $t = 4ms$, $F = 10Hz$.

Se encontró que con duración de pulso y frecuencia alta, se permite a los gases escapar de la zona central, reduciendo la porosidad, sin embargo esto permite la formación de constricciones en la matriz. Por otra parte una duración de pulso corta daría lugar a una velocidad de enfriamiento alta que alentaría el desarrollo de grietas. Así la predisposición al agrietamiento aumenta a medida que la intensidad del láser aumenta y la duración de pulso disminuye. Un corto tiempo de solidificación también evita que las burbujas puedan escapar lo suficientemente rápido del charco de soldadura.

Otro problema serio a la hora de soldar el CMM Al/Gr como se menciono antes fue la formación de constricciones o huecos entre el refuerzo y la matriz. La explicación a este fenómeno se da en términos de la composición química del material y los parámetros de soldadura dependientes del tiempo. Ver Figura 17.

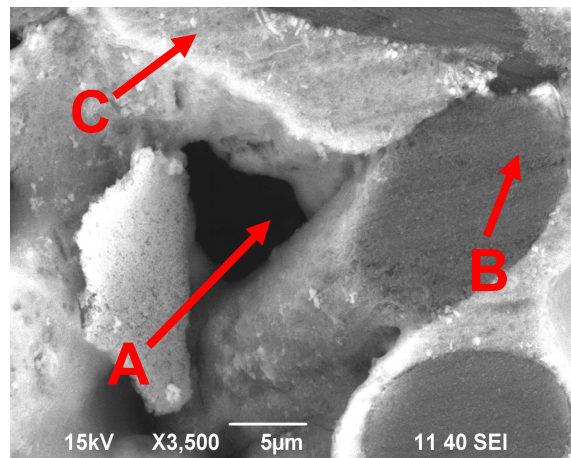


Figura 17. Constricciones matriz-refuerzo debido a la baja mojabilidad del aluminio con el grafito y la influencia de los parámetros. A) Constricción. B) Fibra de grafito y C) Matriz de aluminio.

Iseki et al., y otros autores afirman que a mayor contenido de Si en el metal base se reduce la cantidad de Al_4C_3 formado a temperaturas por encima de $730\text{ }^\circ\text{C}$ [6], y además el coeficiente de expansión térmico de la matriz, disminuye. Ver Figura 18. Sin embargo, a mayor contenido de Si, la fluidez de la aleación aumenta, este efecto se atribuye al calor latente de fusión del Si, el cual es uno de los más altos de todos los elementos naturales ($1790\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), siendo aproximadamente 5 veces mayor que el del aluminio, lo que contribuye a mantener el tiempo de vida del flujo líquido. [7]

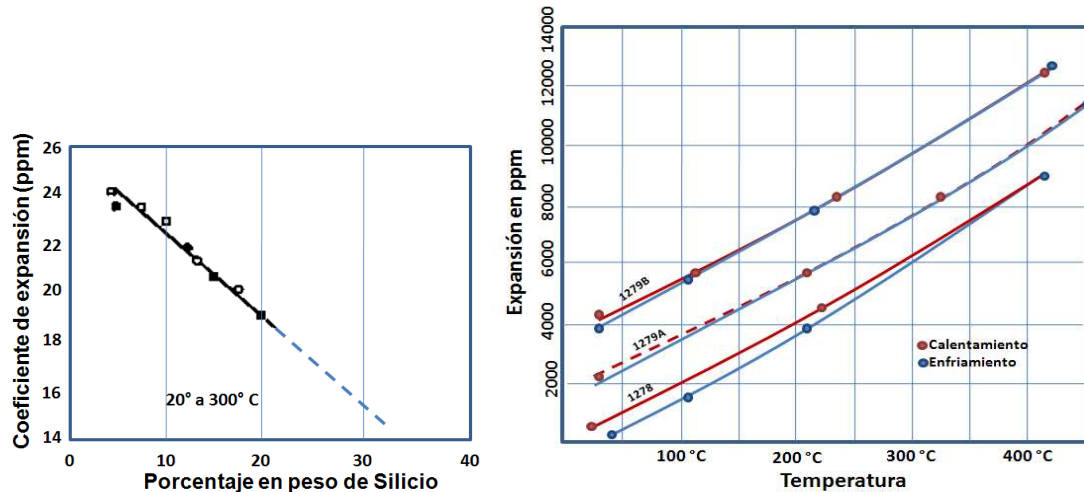


Figura 18. Variación del coeficiente de expansión térmica en función del contenido de silicio y en función de la temperatura. Hidnert P. et al. Hidnert P. et

Además, si se considera que al aumentar la temperatura durante el proceso de soldadura, el volumen de la matriz aumenta también, debido al fenómeno de expansión térmica, como se muestra también en la Figura 18, para tres aleaciones eutécticas de aluminio-silicio. A su vez, como es lógico pensar, durante el calentamiento de la matriz, la densidad del aluminio desciende. Las constricciones o huecos en la matriz se forman cuando el espacio de la zona fundida es insuficiente para contener el nuevo volumen requerido por el aluminio líquido, debido a que las fibras de grafito no permiten que el material se expanda también. Así, el aluminio fundido es expulsado con facilidad hacia la superficie debido a la baja densidad de este y la mayor fluidez del metal líquido por la presencia de silicio y a la baja mojabilidad entre el aluminio y el refuerzo, como se puede apreciar en la Figura 17.

Por lo anterior es lógico pensar que conforme la duración de pulso aumenta la zona afectada por el calor aumenta también y por lo tanto el nivel de constricciones se eleva debido a que el aluminio líquido tiene más tiempo de escapar hacia la superficie dejando huecos en la matriz.

El análisis de resultados corrobora la dependencia que tiene la banda de constricciones formada en el contorno de la zona de fusión con respecto a los parámetros de soldadura principalmente a los del tiempo.

El análisis mostró que la potencia pico, duración de pulso y velocidad de avance, son los parámetros que mas afectan la formación de constricciones en la matriz, sin embargo con respecto al análisis de frecuencia, el estudio muestra poca influencia de la misma, por que como se vio en otro estudio, con el fin de lograr ciclos de trabajo superiores al 50%, la frecuencia debiera ser superior a 167Hz, 125Hz y 100Hz, cuando se emplean duraciones de pulso de 3ms, 4ms y 5ms respectivamente.

V. CONCLUSIONES

En la presente investigación se estudio el efecto de los parámetros de entrada sobre la microestructura de un MMC Al/Gr Al-MetGraf 7-200 soldado por láser. Las conclusiones a las que se llego son las siguientes:

1. Los análisis experimentales mostraron que durante la soldadura laser en modo pulsado a diferentes niveles presentan tres tipos de defectos característicos en la microestructura, a decir:
 - Porosidad: Debido a la alta viscosidad del compuesto fundido, que no permite a las burbujas de gas escapar fácilmente. Lo cual se puede evitar aumentando la duración de pulso a un nivel óptimo.
 - Constricciones de la matriz: Debido a la poca mojabilidad del aluminio con el grafito y a los rápidos ciclos térmicos que no permiten resolidificar en forma adecuada la matriz. Lo cual se puede disminuir si se ingresa una correcta densidad de potencia y se disminuye la duración de pulso con una frecuencia que permita ciclos de trabajo superiores al 50%. A su vez se debe utilizar una rápida velocidad de avance que no permita al aluminio liquido escapar hacia la superficie formando constricciones y que a su vez, la temperatura de enfriamiento se la adecuada para evitar agrietamiento en caliente.
 - Fases perjudiciales (principalmente Al_4C_3): debido a la disolución del grafito en la zona central. Esta discontinuidad puede evitarse si la densidad de potencia se disminuya al mínimo con el fin de lograr una correcta penetración y los ciclos térmicos se aceleran a un nivel óptimo.

2. Para obtener un entendimiento de la secuencia evolutiva de la fase microestructural en términos de las temperaturas de pico efectivas y tiempos sobre esas temperaturas (como una función de la distancia desde la línea central), es necesario crear un modelo de transformación de fase cualitativo.

Los resultados en los diseños experimentales indican que, las altas densidades de energía hacen del proceso láser una técnica atractiva para la unión de CMM de Al/Grafito, sin embargo es necesario investigaciones mas profundas para lograr un conocimiento optimo de las variables involucradas, con el fin de lograr uniones totalmente sanas.

VI. REFERENCIAS

- [1] Mardinly J. 2007. Moore's Law and its Effect on Microscopy in the Semiconductor Industry. Springer. EUA.
- [2] Fernández P., Martínez V. 2006. Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica en el sector eléctrico y electrónico. DYNA año/vol. 73, numero 149. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- [3] Cornie J. A. 2003. Technical Report - Discontinuous Graphite Reinforced Aluminum, and Copper Alloys for High Thermal Conductivity Thermal Expansion Matched Thermal Management Applications. Metal Matrix Cast Composites, LLC. EUA.
- [4] Yue T. M. 1996. Pulsed Nd-YAG Laser Welding of SiC Particulate Reinforced Aluminum Alloy Composite. Hong Kong.
- [5] Simon L. E. 2009. Com. Oral. - Laser Welding Equipment and Process Validation. The University of Wisconsin. EUA.
- [6] Yue T. M. 1997. High power Nd-YAG laser welding of SiC particle reinforced aluminum alloy 2124. Hong Kong.
- [7] Morando C. 2004. Fluidéz de aleaciones de sistemas eutécticos. Anales AFA. Vol. 16 pag. 194. Argentina.
- [8] Hidnert P. 1992. Thermal expansion of aluminium and some aluminium Alloys. Journal of Resarch of National Bureau of Standards. EUA.