

USO DE LÁSERES DE DIODO DE ALTA POTENCIA PARA LA SOLDADURA DE MATERIALES ALSIC Y ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

Investigador Director del proyecto:

Dr. Joaquín Rams Ramos
Profesor Titular de Universidad
Departamento de Ciencia e ingeniería de los materiales
Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología
Universidad Rey Juan Carlos
C/ Tulipán s/n, Móstoles 28933, Madrid

Miembros del grupo investigador

Dr. Alejandro Ureña Fernández
Catedrático de Universidad
Departamento de Ciencia e ingeniería de los materiales
Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología
Universidad Rey Juan Carlos
C/ Tulipán s/n, Móstoles 28933, Madrid

Dra. M^a Victoria Utrilla Esteban
Profesora Titular de Universidad
Departamento de Ciencia e ingeniería de los materiales
Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología
Universidad Rey Juan Carlos
C/ Tulipán s/n, Móstoles 28933, Madrid

1. ANTECEDENTES

1.1. El láser cómo herramienta para el soldeo de materiales

En los últimos años el láser se ha revelado como una herramienta de gran utilidad en el procesado de materiales, mostrándose como un elemento muy versátil que puede emplearse en el corte, soldadura y tratamiento superficial de todo tipo de materiales, tanto cerámicos como metálicos, poliméricos y materiales compuestos de muy diferentes características. A pesar de ello, representa una tecnología que no ha terminado de implantarse de forma generalizada en el ámbito industrial, donde herramientas como la soldadura plasma o por arco están mucho más extendidas. El principal problema que se ha encontrado tradicionalmente el láser es que se trata de una tecnología más sensible al entorno y que resulta más difícil de mantener operativa al 100 % de su capacidad. Estos problemas se han solucionado en gran medida al madurar la tecnología de los láseres de alta potencia para aplicaciones industriales.

Los nuevos equipos láser de Nd:YAG, CO₂ y de diodo de alta potencia requieren un mantenimiento muy inferior al que presentaban hace tan solo cinco años. Los láseres de Nd:YAG se bombean en la actualidad con diodos en lugar de con lámparas, mientras que los láseres de CO₂ se hacen ahora con cámara sellada para minimizar el mantenimiento. Pero, a pesar del enorme desarrollo de los últimos años, estos equipos presentan otras limitaciones. Los láseres de Nd:YAG más empleados son láseres pulsados dada la naturaleza intrínseca de la emisión del neodimio, para obtener láseres continuos como los que se necesitan para la soldadura de materiales metálicos con una elevada velocidad fabricación del cordón es necesario acudir a equipos de gran coste y complejidad tecnológica. Se puede bombear la cavidad láser con lámparas o con diodos; en el primer caso la vida media de las lámparas es muy baja, así como su rendimiento energético, en el segundo caso el coste es muy elevado, aunque la eficiencia energética de los diodos de bombeo mejora el rendimiento general de los equipos. Por otro lado, los láseres de CO₂ pueden operar con grandes potencias incluso en continuo, pero tienen el inconveniente intrínseco de que la longitud de onda de la luz láser emitida es de 10,6 μm, lo que hace que la absorción de la energía por parte de una gran cantidad de materiales metálicos y cerámicos sea muy reducida. Esto hace necesario emplear potencias mucho más elevadas que las que serían necesarias con otras fuentes de luz láser. Finalmente, muy pocos materiales y de gran coste son transparentes a esta

radiación, de manera que el uso de ventanas queda muy reducido, así como el uso y tipo de gases de protección o gases reactivos que se pueden emplear para optimizar los procesos de corte y soldadura.

En este entorno en los últimos años han surgido los láseres de diodo de alta potencia. Hasta hace relativamente poco tiempo, disponer de un láser de diodo tan sólo 40 W resultaba extremadamente caro y la vida media de esos dispositivos era muy reducida. En la actualidad se dispone de láseres de diodo de hasta 6 kW con unas vidas en servicio muy superiores a las de otros tipos de láser, y con la ventaja de que los diodos láser pueden trabajar con emisión en continuo, de hecho ésta forma de trabajar es la más natural para estos láseres. Una de las grandes ventajas que aportan estos láseres reside en su elevada eficiencia energética; los láseres de diodo pueden aportar en forma de luz hasta el 40 % de la energía que consumen, mientras que los láseres de Nd:YAG alimentados por lámparas tienen rendimientos inferiores al 3 %. Esto tiene dos grandes implicaciones: por una parte el consumo general de estos equipos es muy inferior al de los láseres de otro tipo; y por otro, el tamaño, coste y consumo de los elementos auxiliares como enfriadoras o fuentes de alimentación es mucho más reducido. A modo de comparativa sirva el siguiente ejemplo: un láser de diodo de 1400 W de potencia máxima en continuo tiene un consumo máximo de 5 kW, usa una enfriadora cuyo consumo máximo es de 6 kW, y en conjunto tienen un peso total inferior a los 200 kg; mientras, un láser de Nd:YAG de 500 W de potencia promedio que opera pulsado (los láseres en continuo tienen aún rendimientos inferiores) tiene un consumo de 23 kW, usa una enfriadora de 11 kW y tiene un peso total de 600 kg.

Entre otras ventajas, los láseres de diodo de alta potencia no tienen en su interior partes móviles o cavidades abiertas, por lo que no requieren alineaciones o trabajos externos tan complejos como los otros tipos de láseres. Además, al estar sellados son menos sensibles al polvo o a los gases que se desprendan durante los procesos empleados. Finalmente está el problema del coste del equipo. Dadas las evidentes ventajas operativas de los láseres de diodo cabe pensar que su coste va a ser muy superior al de otro tipo de láseres, pero en los últimos años su precio se ha reducido en gran medida y, en la actualidad, un láser de diodo de alta potencia tiene un coste que es aproximadamente un 25 % del que tiene un láser de Nd:YAG de potencia equivalente. Por tanto, el desarrollo de aplicaciones para este tipo de láseres permitirá a un gran

número de empresas acceder a una tecnología de soldadura de gran productividad que produce acabados de una gran calidad.

En el presente proyecto se plantea el uso de los láseres de diodo de alta potencia para el soldeo de dos tipos de materiales de muy diferente naturaleza y aplicaciones:

- A) Soldeo de aceros inoxidable dúplex de especial interés por su utilización creciente en las industrias química y petroquímica, y cuya soldabilidad está condicionada por el mantenimiento de la estructura austenoferrítica que asegura una interesante combinación de propiedades químicas y mecánicas.

- B) Soldeo de materiales compuestos de Al-SiC con alto contenido en refuerzo para encapsulado y soportes de sistemas electrónicos. En este caso, se trata de unir materiales que, aunque poseen una matriz metálica (aluminio), están constituidos de hasta un 70 % en volumen de fase cerámica (SiC) lo que limita de forma drástica su soldabilidad.

Se trabajará inicialmente con espesores de 3 mm para evidenciar las posibilidades industriales de los láseres de diodo de alta potencia, estudiándose posteriormente la posibilidad de trabajar con otros espesores. A continuación se describen algunos aspectos generales de la aplicación y los problemas de unión asociados a ambas familias de materiales

1.2. Aceros inoxidables dúplex: aplicaciones y soldabilidad

Los aceros inoxidables dúplex han llegado a ser una alternativa importante a los aceros inoxidables austeníticos debido a la combinación de alta resistencia a la corrosión localizada y a la corrosión bajo tensión. La resistencia a fluencia es de dos a tres veces mayor que la de los austeníticos y la resistencia a tracción un 25 % superior. Presentan una resistencia a la corrosión bajo tensión por cloruros algo inferior a los ferríticos, pero superior a la de austeníticos, pero son más fáciles de fabricar y soldar. Además el precio es competitivo comparado con austeníticos convencionales, ferríticos y aleaciones base níquel. Por ello, las aplicaciones de estos materiales como material estructural en la industria han aumentado considerablemente.

Estos materiales muestran propiedades óptimas cuando la relación en volumen austenita/ferrita (α/γ) es 1:1. Sin embargo, durante algunos procesos de fabricación, tales como soldadura y otros tratamientos térmicos, esta relación puede cambiar por la precipitación de compuestos intermetálicos en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor. Para aplicaciones prácticas de uniones soldadas se consideran aceptables porcentajes de ferrita en el baño entre el 30 y el 70%. Este contenido en ferrita es función de la composición química y de las velocidades de enfriamiento de la soldadura, que dependen a su vez del aporte térmico en las zonas de unión (ENA).

La presencia de algunas fases diferentes formadas durante los ciclos térmicos como la fase sigma (σ), que precipita en los límites de grano ferrita/austenita, produce fragilidad y disminución de resistencia a corrosión bajo tensión. En general, la soldadura de los aceros inoxidable dúplex presenta mayores contenidos en ferrita, mayor tamaño de grano y precipitación de Cr_2N que el metal base. Estos cambios debidos al proceso de soldeo disminuyen la resistencia a corrosión y las propiedades mecánicas.

La cantidad de austenita resultante a temperatura ambiente en uniones soldadas es función de la historia térmica del proceso de soldadura. Elevadas velocidades de enfriamiento y altas temperaturas de pico conducen a un mayor contenido en ferrita en el metal fundido. La ferrita es más susceptible que la austenita a formar fases secundarias pues la difusión de los elementos de aleación en ferrita es del orden de 100 veces más rápida que en la austenita.

Para contrarrestar estos efectos hay varias soluciones como son las de utilizar metales de aporte aleados con elementos austenizantes como el níquel, o llevar a cabo un control eficiente de las condiciones energéticas para evitar la aparición de las fases perjudiciales durante el proceso de soldeo. Esta última alternativa es la que abre el campo de la utilización del láser como fuente de energía para soldar este tipo aceros de inoxidables.

En la soldadura láser la unión se consigue mediante la energía de un haz luminoso coherente altamente concentrado y enfocado a la unión que se va a soldar. Produce acabados de alta calidad, profunda penetración y una estrecha zona afectada por el calor. El desarrollo en los últimos años de técnicas de soldeo de láser pulsado y la puesta a punto de los equipos de láser de diodo, más competitivo desde el punto de vista

económico, abre nuevos campos de aplicación para la soldadura láser de aleaciones férreas de espesor limitado (entre 2 y 5 mm).

Es, por tanto, un factor importante, el poder predecir los cambios microestructurales que se producen en las zonas contiguas al cordón de soldadura y sus dimensiones. Esto obliga a realizar un uso eficiente de la densidad de potencia de soldeo con el objetivo de lograr una buena unión con la menor zona afectada por el calor y una anchura más reducida en el baño. Una importante contribución para la consecución de este objetivo reside en el desarrollo de modelos para predecir los cambios térmicos y microestructurales que se producen durante la operación de soldeo.

1.3. Materiales compuestos de Al-SiC con alto contenido en refuerzo: aplicaciones y soldabilidad

Una de las características actuales de la industria electrónica es la necesidad de incrementar día a día la densidad del empaquetamiento de los componentes electrónicos y de microondas, a la vez que se hacen más exigentes los requerimientos de comportamiento a los que éstos están sometidos. Estos requerimientos han traído consigo la necesidad de implementar materiales con superiores propiedades. En primer lugar, los materiales empleados para el encapsulado de los dispositivos electrónicos (*electronic packages*), que pueden emplearse en forma de cajas herméticas o simplemente como portadores (*carriers*) de los elementos electrónicos, deben tener un coeficiente de dilatación térmica (CTE) próximo a de los substratos cerámicos que actualmente se emplean (alúmina o nitruro de aluminio), o a los semiconductores (silicio o arseniuro de galio) que constituyen el componente principal del dispositivo electrónico.

También se requieren buenas propiedades mecánicas, baja densidad y durabilidad ambiental, especialmente en aplicaciones que exijan máximo comportamiento, reducido peso y servicio en atmósferas agresivas. Por último, los sistemas de encapsulado deben soldarse para conseguir el nivel de hermeticidad requerido y, cuando actúan directamente como *carriers* de los componentes electrónicos, deben recubrirse con aleaciones de Au o Ni, para proteger los sistemas contra la corrosión y para facilitar el soldeo y la unión de las diferentes etapas electrónicas. Por tanto, los nuevos materiales desarrollados deben cumplir los requerimientos de soldabilidad y plateado exigidos.

En los últimos años, se ha comenzado a emplear materiales metálicos como el molibdeno y wolframio, o materiales compuestos metal-metal del tipo W-Cu y Mo-Cu que se caracterizan por su favorable conductividad térmica y sus compatibles CTEs. Sin embargo, su uso implica un incremento muy importante en peso y poseen además una limitada soldabilidad. La aplicación de materiales compuestos de matriz metálica (MMCs) con elevado porcentaje de refuerzo cerámico en sistemas de encapsulado de componentes electrónicos se investiga desde finales de los 80. Desde esa fecha, algunos componentes electrónicos encapsulados ya comercializados utilizan este tipo de MMCs en su fabricación. El candidato más importante dentro de esta familia de materiales compuestos para aplicaciones de encapsulado electrónico es el sistema carburo de silicio/aluminio (AlSiC). Una de las principales ventajas del empleo de materiales compuestos AlSiC es poder diseñar el coeficiente de dilatación lineal del material modificando la composición de la aleación de aluminio y el contenido en SiC. Los valores de CTEs que pueden alcanzarse son ligeramente superiores a los de substratos cerámicos tradicionalmente empleados en electrónica y circuitos de microondas.

Dos aspectos adicionales deben considerarse a la hora de diseñar un material para encapsulado electrónico: 1) debe poder soldarse para conseguir cierres herméticos y 2) tiene que poder ser recubierto (plateado) para mejorar su resistencia a ambientes agresivos y facilitar la unión de los dispositivos electrónicos del circuito.

La soldadura de los materiales compuestos de matriz de aluminio es aún un tema en desarrollo, en la que el grupo que propone el presente proyecto tiene una dilatada experiencia adquirida después de cerca de 10 años de investigación. En el caso concreto de los materiales de matriz de aluminio con refuerzo de SiCp se han realizado y se siguen realizando numerosas investigaciones, tanto empleando técnicas de unión en estado sólido: soldadura por difusión, por fase líquida transitoria o por fricción (*friction-stir welding*); como mediante técnicas que suponen la fusión del material con TIG, MIG, plasma, láser, haz de electrones, etc.

También se han evaluado las técnicas de soldeo heterogéneo (p.e. soldadura fuerte a vacío) con éxito dispar. El problema de la unión de los SiCp/Al por técnicas convencionales de fusión es la reducida mojabilidad del SiC por parte del aluminio fundido, lo que genera graves problemas de porosidad, distribución heterogénea del

refuerzo e incluso de faltas de fusión. Aunque algunos de los procedimientos de soldeo propuestos son factibles a la hora de unir materiales compuestos Al/SiCp que contienen entre un 10 y un 20 % de refuerzo, ninguno es aplicable al elevado porcentaje de partículas que deben contener los materiales a utilizar en el encapsulado electrónico.

La aplicación del soldeo láser se presenta como una alternativa a evaluar para resolver los problemas de soldabilidad de los materiales AlSiC aprovechando la ventaja que supone el lograr un calentamiento diferenciado en los dos constituyentes que forman el material (la matriz y el refuerzo). Asimismo, la técnica láser permite trabajar en condiciones de control de la atmósfera de soldeo y empleo de aleaciones activas (p.e. base titanio) que lograrían superar los conocidos problemas de mojabilidad entre el aluminio y el SiC, responsables en gran medida de las limitaciones de soldabilidad de esta familia de materiales.

1.4. Bibliografía más relevante

- Láseres de diodo: fundamentos, aplicaciones y soldeo

1. G. Casalino, F. Curcio, F.M.C. Minutolo, *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 422-428.
2. J. H. Zhu, L. Li, A. Liu, *Applied Surface Science* 247 (2005) 300-306.
3. C. W. Tan, Y. C. Chan, B.N.W. Leung, et al. *Optics and Lasers in Engineering* 43 (2005) 151-162.
4. H. Haferkamp, A. von Busse, s. Barcikowski, et al, *Journal of Laser Applications* 16 (2004) 198-205.
5. J. L. Bocos, F. Zubiri, f. Garciandia, J Peña, A. Cortiella, J. M. Berrueta, F. Zapirain, *Revista de Metalurgia* 40 (2004) 146-151.
6. A. Sanchez-Castillo , J. Pou , F. Lusquinos, F. Quintero, R. Soto, M. Boutinguiza, M. Saavedra, M. Perez-Amor, *Revista de Metalurgia* 40 (2004) 204-208.
7. D. Triantafyllidis, M. J. J. Schmidt, L. Li, *Journal of Materials Processing Technology* 138 (2003) 102-108.
8. C. A. Walsh, HKDH Bhadeshia, A. Lau, B. Matthias, R. Oesterlein, J. Dechsel, *Journal of Laser Applications* 15 (2005) 68-76.
9. F. Bachmann, *Applied Surface Science* 208 (2003) 125-136.
10. L. Li, *Optics and Lasers in Engineering* 34 (2000) 231-253.
11. B. Bryden, *Assembly Automation* 20 (2000) 136-139.
12. W. Schulz, R. Poprawe, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 6 (2000) 696-705.
13. E.S. Ng, I. A. Watson, *Journal of Laser Applications* 11 (1999) 273-278.

- Aceros inoxidables dúplex: aplicaciones y soldeo

1. T.H. Chen, K. L. Weng, J.R. Yang, *Materials Science and Engineering A*, 338, (2002) 259-270.
2. J.D. Kordatos, G. Fournalaris, G. Papadimitriou, *Scripta Materialia*, 44 (2001) 401-408

3. Yaowen Wang, Qiang Chen, Journal of Materials Processing Technology, 120 (2002) 270-274.
4. Jitai Niu, Wei Guo, Mianhuan Guo, Shixiong Lu, Vacuum, 65 (2002) 263-266.
5. E. Capello, P. Chiarello, B. Previtali and M. Vedani, Materials Science and Engineering A, 351, (2003) 334-343.
6. N. A. McPherson, K. Chi and T. N. Baker, Journal of Materials Processing Technology, 134, (2003) 174-179.
7. Ramazan Kaçar, Materials & Design, 25, (2004) 1-9.
8. V. Muthupandi, P. Bala Srinivasan, S. K. Seshadri and S. Sundaresan, Materials Science and Engineering A, 358, (2003) 9-16.
9. Z. Sun, M. Kuo, I. Annergren and D. Pan, Materials Science and Engineering A, 356, (2003) 274-282.
10. T. H. Chen and J. R. Yang, Materials Science and Engineering A, 338, (2002) 166-181.
11. J. S. Ku, N. J. Ho and S. C. Tjong, Journal of Materials Processing Technology, 63, (1997) 770-775.
12. A.T. Male, P.J. Li, Y.W. Chen, Y.M. Zhang, Journal of Materials Processing Technology, 115 (2001) 61-64.
13. J. Ion, K. Easterling and M.F. Ashby. Acta Metalurgica. 32 (11), (1984) 1949-1962.
14. C. Chan, J. Mazumder and M.M. Chen. Metall Trans A. 15A (12) (1984) 2175-2184.
15. D. Couédel, P. Rogeon, P. Lemasson, M. Carin, J.C. Parpillon, R. Berthet, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46 (2003) 4553-4559.
16. Z. Yang, S. Sista, J.W. Elmer, T. Debroy, Acta Materialia, 48 (2000) 4813-4825.
17. G. Brüggemann, A. Mahrle, Th. Benziger, NDT&E International, 33, (2000) 453-463.

- Materiales AlSiC: aplicaciones y soldeo

1. J. Barret. Microelectron. Reliab 38 (1998) 1277.
2. C. Johnston, R. Young. International Newsletter on Microsystems and MEMs 1 (2000) 14.
3. K. A. Moores, Y.K. Joshi. Future Circuís INt 7 (2001) 45.
4. C. Zweben, in Proc. IMAPS Inter. Symp. on Advanced Packaging Materials. Braselton. Georgia. (2001) p. 360.
5. R.W. Sibold, J.J. Licari, R.L. Brown. SAMPE Journal, 33 (1997) 1
6. D.C. Packard. SAMPLE J. Jan/Feb (1984) 6.
7. X. Dumant. Cercast Group Product Brochure. May (1991)
8. Liu Limming, Zhu Meili, Pan Longxi, Wu Lin. Materials Science and Engineering A315 (2001) 103.
9. Y Zhai. T.H. North. Journal of Materials Science 32(6) (1997) 139.
10. J.A. Wert. Scripta Materialia 49 (2003) 607
11. M.B.D. Ellis. Internacional Materials Review. 41 (1996) 41
12. T. J. Lienert, E. D. Brandon and J. C. Lippold. Scripta Metallurgica et Materialia. 28 (1993) 1341.
13. R. Gürler. Journal of Materials Science Letters 17 (1998) 1543.
14. T. M. Yue. Applied Composite Materials 4(1) (1997) 53
15. X.P. Zhang, G.F. Quan, W. Wei. Composites. Part A: applied science and manufacturing. 30 (1999) 823.

2. OBJETIVOS TÉCNICOS

La investigación propuesta tiene claramente un enfoque que permite clasificar al proyecto como de investigación aplicada, siendo sus objetivos:

1. Optimización de las condiciones de soldeo que pueden controlarse cuando se emplean fuentes láser de diodo como alternativa al soldeo de materiales metálicos o compuestos con problemas de soldabilidad, tanto desde el punto de vista operativo como metalúrgico.
2. Desarrollo de un procedimiento de soldeo con láser de diodo aplicable a materiales Al-SiC con alto contenido en refuerzo empleados para la fabricación de cajas herméticas de encapsulado de componentes electrónicos.
3. Desarrollo de un procedimiento de soldeo láser autógeno aplicable a aceros inoxidables dúplex de 3 mm de espesor, que asegure el mantenimiento de propiedades mecánicas y químicas en la unión.

3. METODOLOGÍA

La metodología que a priori se pretende seguir en el proyecto de investigación planteado es la que en un principio se considera como la más adecuada para cumplir los objetivos técnicos anteriormente enumerados. Para ello se plante la consecución de los siguientes hitos:

1. Realización de uniones soldadas en aceros inoxidables dúplex mediante soldadura láser de diodos persiguiendo:
 - Penetraciones en el intervalo 3 – 5 mm sin aporte de material.
 - Optimización de las condiciones óptimas de soldeo para asegurar un comportamiento local y metalúrgico adecuado.
 - Análisis de la influencia de la atmósfera de soldeo.
2. Realización de uniones soldadas en material compuesto AlSiC mediante soldadura láser de diodos persiguiendo:
 - Penetraciones de hasta 3 mm.

- Selección de materiales de aporte reactivos.
 - Análisis de la influencia de la atmósfera de soldeo.
 - Optimización de las condiciones óptimas de soldeo para asegurar comportamiento local y metalúrgico adecuado.
3. Caracterización microestructural de las diferentes zonas producidas en las uniones soldadas (ZAC, metal fundido), mediante microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (SEM) y microanálisis por espectros de energías dispersivas (EDS).
 4. Caracterización mecánica de las uniones soldadas mediante ensayos de dureza, tracción, plegado y fractura.
 5. Determinación y modelización de los ciclos térmicos durante el soldeo para caracterizar condiciones de calentamiento, temperatura de pico y enfriamiento, y poder predecir cambios microestructurales que tienen lugar en los aceros dúplex como consecuencia del proceso de soldeo.

4. PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo se estructura a través de diferentes actividades que se distribuirán en el tiempo tal como se indica en el cronograma adjunto.

Actividad 1. Estudio bibliográfico y técnico.

Esta actividad se llevará a cabo durante todo el proyecto, y tendrá una primera vertiente en la que se emplearán diferentes bases de datos para la recopilación y estudio de los trabajos científicos, patentes y demás información que pueda ser relevante para el presente proyecto. Se atenderá a las siguientes cuestiones:

- a) Métodos de soldadura láser que impliquen láseres de diodo, de Nd:YAG y de CO₂.
- b) Técnicas de soldeo láser de aceros inoxidable, centrandó especialmente la atención en el soldeo de aceros inoxidable dúplex.
- c) Técnicas de soldeo láser de materiales compuestos de matriz metálica, atendiendo sobre todo al soldeo de compuestos con un elevado porcentaje de la fase cerámica, en particular porcentajes superiores al 50 %.

- d) Métodos de evaluación de las propiedades mecánicas de uniones soldadas en aceros y materiales compuestos de matriz metálica.
- e) Técnicas de evaluación de la sensibilidad química y a la corrosión de las uniones por láser en los materiales de interés.

Por otra parte, en esta actividad se establecerán contactos con diferentes empresas desarrolladoras y suministradoras de láseres de alta potencia para determinar el coste de venta y de mantenimiento de los nuevos equipos que se encuentren en comercialización, atendiendo a su naturaleza y tecnología. De igual manera, se hará un estudio acerca de la evolución en la comercialización de los diferentes tipos de láseres (número de equipos y valor de mercado).

Actividad 2. Selección de los materiales

En una primera etapa se utilizarán aceros inoxidable dúplex 2205 y materiales compuestos de matriz de aluminio (AlSiC) con un 70 % de refuerzo de SiC. En ambos casos se trabajará inicialmente con materiales de 3 mm de espesor y, conforme se desarrollen los resultados, se estudiará el variar el espesor de los materiales para determinar las condiciones de soldeo más favorables en función del espesor en ambos materiales.

Actividad 3. Caracterización de los materiales de partida

Resulta necesario, para poder determinar la viabilidad de los procesos de soldeo sobre los diferentes materiales, determinar las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión de los diferentes materiales que se pretende unir.

Actividad 4. Estudio de las variables que afectan al soldeo de aceros dúplex

Esta actividad es una de las bases del presente proyecto y se articulará en 3 etapas diferentes:

- *Actividad 4.1.* Se analizará el efecto de las diferentes variables que se pueden controlar en un proceso de soldeo láser como son la potencia, la densidad de potencia, la velocidad de soldadura, la posición relativa entre el foco y la superficie del material y su orientación relativa. También se estudiará el efecto de la preparación de la muestra antes del proceso de soldeo.
- *Actividad 4.2.* Uno de los aspectos más relevantes de los procesos de soldadura es evitar la degradación de la unión que suelen tener los materiales por la

exposición ambiental del baño fundido unión durante el proceso de soldeo. Por ello se desarrollará una cámara donde se pueda llevar a cabo el soldeo en presencia de diferentes tipos de gases de protección como son Ar, mezclas Ar/He y vacío.

- *Actividad 4.3.* Cuando se tengan definidas las mejores condiciones de soldeo en la cámara, se desarrollarán métodos para reproducir los resultados obtenidos en ausencia de cámara mediante la protección con flujos de gases de soldadura y de respaldo.

Actividad 5. Evaluación de las uniones soldadas en materiales inoxidables dúplex.

Esta actividad tendrá dos vertientes que se identifican a continuación:

- *Actividad 5.1.* Evaluación mecánica de las uniones soldadas. Se realizarán ensayos de flexión, tracción, doblado y dureza para validar la soldadura sobre estos materiales.
- *Actividad 5.2.* Se evaluará la sensibilidad a la degradación ambiental de las uniones soldadas mediante ensayos en diferentes medios agresivos como son ácidos en disolución y gases agresivos, así como en cámaras ambientales y de niebla salina.

Actividad 6. Modelización de los ciclos térmicos durante el proceso de soldeo.

Esta actividad tendrá dos vertientes que se identifican a continuación:

- *Actividad 6.1.* Puesta a punto de sistemas de medida de la temperatura en diferentes zonas de los materiales soldados. Se emplearán técnicas basadas en termopares y se implementará un sistema basado en una cámara termográfica.
- *Actividad 6.2.* Modelización de las transiciones de fase que tienen lugar en los materiales en función de los ciclos térmicos medidos en la actividad 6.1.

Actividad 7. Estudio de las variables que afectan al soldeo de material compuesto AISiC.

Esta actividad se articulará en 3 etapas diferentes:

- *Actividad 7.1.* Se analizará el efecto de las diferentes variables de potencia, densidad de potencia, velocidad de soldadura, posición relativa entre el foco y la superficie del material y su orientación relativa.
- *Actividad 7.2.* Se realizarán estudios empleando cámaras de gases para el estudio del efecto de utilizar diferentes de protección como son Ar, Ar/He,

vacío, etc. También se evaluará el empleo de N₂ o mezclas de gases que contenga este gas, dado el sabido incremento de mojabilidad entre el aluminio fundido y el SiC que se produce cuando en la atmósfera existen altas concentraciones de este gas.

- *Actividad 7.3.* Se intentará reproducir los mejores resultados obtenidos en la actividad 7.2. en ausencia de cámara mediante la protección de flujos de gases de soldadura y de respaldo.

Actividad 8. Evaluación de las uniones soldadas en materiales compuestos AlSiC

Esta actividad tendrá dos vertientes que se identifican a continuación:

- *Actividad 8.1.* Evaluación mecánica de las uniones soldadas. Se realizarán ensayos de flexión, tracción y de resistencia a las vibraciones para validar la soldadura sobre estos materiales.
- *Actividad 8.2.* Se evaluará la sensibilidad a la degradación ambiental de las uniones soldadas mediante ensayos en diferentes medios agresivos como son ácidos en disolución y gases agresivos, así como en cámaras ambientales y de niebla salina. También se estudiará la sensibilidad de las uniones al recubrimiento electrolítico de níquel y de oro.

Actividad 9. Interpretación y discusión de los resultados

El análisis e interpretación de los resultados se llevará a cabo durante toda la duración del proyecto, y condicionará la evolución del estudio hacia otros materiales, espesores y procesos de soldeo láser.

Actividad 10. Conclusiones, publicación y transferencia tecnológica de los resultados

Tras establecer las conclusiones más relevantes del trabajo se procederá a la realización del pertinente informe a la Fundación Domingo Martínez, así como la redacción de los artículos científicos y patentes a que pudiera dar lugar, teniendo siempre en consideración las condiciones impuestas en las bases de la presente convocatoria.

5. CRONOGRAMA

ACTIVIDAD	Mensualidad											
Actividad 1. Estudio bibliográfico y técnico	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Actividad 2. Selección de los materiales	■									■		
Actividad 3. Caracterización de los materiales de partida		■	■	■							■	
Actividad 4. Estudio de la variables relevantes soldeo acero dúplex												
Actividad 4.1. Optimización de parámetros					■	■	■	■				
Actividad 4.2. Optimización de gases de soldeo y protección						■	■	■	■			
Actividad 4.3. Implementación de gases sin cámara										■	■	
Actividad 5. Evaluación de uniones soldadas en acero dúplex												
Actividad 5.1. Evaluación mecánica										■	■	■
Actividad 5.2. Evaluación química y a corrosión										■	■	■
Actividad 6. Modelización de los ciclos térmicos durante el soldeo												
Actividad 6.1. Puesta a punto de sistema de medida de temperatura										■	■	
Actividad 6.2. Modelización de las transiciones de fase en material											■	■
Actividad 7. Estudio de la variables relevantes soldeo AlSiC												
Actividad 7.1. Optimización de parámetros						■	■	■	■			
Actividad 7.2. Optimización de gases de soldeo y protección							■	■	■	■		
Actividad 7.3. Implementación de gases sin cámara											■	
Actividad 8. Evaluación de uniones soldadas en AlSiC												
Actividad 8.1. Evaluación mecánica										■	■	■
Actividad 8.2. Evaluación química y a corrosión										■	■	■
Actividad 9. Interpretación y discusión de resultados					■	■	■	■	■	■	■	■
Actividad 10. Conclusiones, publicación y transferencia resultados.										■	■	■

6. BENEFICIOS DEL PROYECTO

Como se ha mostrado en la presente memoria, la implantación de los láseres de diodo en la industria española permitiría a numerosas empresas de variado tamaño acceder a los probados beneficios de la tecnología láser junto con un coste de equipamiento y un coste operativo muy inferiores a los que eran necesarios hasta hace poco tiempo. En general los beneficios que se pueden extraer del proyecto son los siguientes:

Beneficios científicos: la investigación a desarrollar en el proyecto permitirá ampliar el conocimiento sobre los procedimientos de unión de los materiales compuestos de matriz de aluminio con alto nivel de refuerzo cerámico, y sobre las uniones y procesos térmicos que tienen lugar en los aceros dúplex. Se trata del desarrollo de unos procesos que permitirán obtener uniones con elevadas prestaciones gracias a la optimización de su proceso de fabricación. Para lograr este objetivo, es necesario establecer durante todo el proyecto las relaciones entre composición-estructura-procesado-propiedades-aplicaciones que existen en las uniones realizadas.

Beneficios tecnológicos: la consecución de los objetivos planteados en el presente proyecto permitirá desarrollar métodos de unión directamente aplicables al encapsulado de componentes electrónicos en sectores industriales donde la reducción del peso del dispositivo (p.e. un radar de microondas) es prioritaria. Por otra parte, permitirá obtener un método de unión directamente aplicable a industrias que requieran el uso de aceros inoxidables de muy altas prestaciones.

Beneficios económicos: como se ha indicado anteriormente, el coste de los láseres que se han implantado hasta la fecha ha sido tan elevado que se ha convertido en una tecnología a la que pocas empresas podían optar. El desarrollo de procesos de fabricación basados en un láser mucho más asequible y de menor consumo permitirá que una gran cantidad de empresas pueda contemplar los beneficios que la soldadura láser tiene en cuanto a calidad, reproducibilidad, productividad y limpieza.