

José Luis Ocaña Moreno

**EL LÁSER, ELEMENTO CLAVE  
EN LAS MODERNAS TECNOLOGÍAS  
DE FABRICACIÓN**

30 de Noviembre de 1994

**EL ILMO. SR. D. JOSÉ LUIS OCAÑA MORENO**, ES DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL, PREMIO EXTRAORDINARIO DE DOCTORADO, CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD EN LA UNIVERSIDAD DE A CORUÑA.

Excmo. Sr. Almirante,  
Excmo. y Magfco. Sr. Rector,  
Dignísimas autoridades,  
Señoras y señores:

Es para mí un gran honor el haber sido llamado a pronunciar esta conferencia inaugural de la Cátedra Jorge Juan, marco institucional insigne concebido para la fructífera colaboración entre nuestras instituciones naval y universitaria.

Deseo, por ello, mostrar, en primer lugar, mi agradecimiento a las personas que me encomendaron tan noble e inmerecida tarea, y manifestar mi más ferviente apoyo a tan loable y con seguridad fructífera iniciativa como la de constitución de esta Cátedra, haciendo votos por que dedicación y contribución al avance de las ciencias y la técnica como las del insigne ingeniero y marino Jorge Juan puedan ser permanentemente conmemoradas y objeto de emulación.

Con el mismo espíritu de deseo de innovación y fomento del progreso que sin duda animó el trabajo de tan insigne prohombre, esta conferencia inaugural viene a presentar ante tan digna audiencia uno de los temas que en el momento actual están revolucionando el mundo de las tecnologías de fabricación (pilar fundamental para el progreso de los pueblos), como es la incorporación del láser a un sinnúmero de aplicaciones cada vez más diversas.

Desearía, en todo caso, no obstante, antes de comenzar con el desarrollo de la conferencia propiamente dicha, pedir humildemente perdón por sus innumerables defectos, por supuesto no achacables a la importancia intrínseca del tema, sino más bien a las propias limitaciones de quien en este momento les habla.

## INTRODUCCIÓN

El mundo de las tecnologías de fabricación ha sido tradicionalmente un motor fundamental del desarrollo industrial y estratégico de las naciones, pues ha implicado de forma constante la necesidad de definición o asimilación de técnicas con una importancia decisiva para el avance y mantenimiento de dichos sectores. No se concibe, en efecto, ningún desarrollo importante en estos campos sin la presencia de unas tecnologías de fabricación capaces de proporcionar de forma tangible los elementos físicos sobre los cuales basar todo posterior desarrollo; sin unas adecuadas definición y ejecución de procesos de fabricación de los componentes precisos en cada caso, difícilmente puede llegarse a su utilización en sistemas tecnológicos más sofisticados. Por ello, no es extraño que el área de los procesos de fabricación haya sido, de forma tradicional, un área que ha recibido gran atención por parte de los sectores mencionados.

En función de la referida importancia, y teniendo en cuenta la rapidez de evolución tecnológica en el mundo en que hoy día nos movemos, resulta de especial interés el conocer siquiera algunas de las tendencias más importantes que se apuntan como de carácter decisivo desde el punto de vista de previsión del desarrollo de este sector con vistas al futuro.

Así, de forma similar a otros aspectos clave configuradores del estado actual de la tecnología, como el desarrollo de la robótica, la inteligencia artificial y el relativo a uso de nuevos materiales, la introducción de la *Tecnología Láser* en el mundo productivo ha supuesto un hito sin precedentes para la moderna concepción de dichos procesos, al permitir un cambio fundamental de filosofía en la definición de los mismos basada en las extraordinarias propiedades y posibilidades de uso de esta singular herramienta.

En efecto, desde la aparición del primer láser en 1960, su utilización en las más diversas aplicaciones científicas y tecnológicas no ha cesado de crecer de forma mantenida, y el desarrollo diversificado de láseres de todo tipo, capaces de operar sobre un amplio rango de longitudes de onda, y con cada vez más elevadas potencias de pico y posibilidades de enfoque, ha conducido a un extremadamente amplio conjunto de aplicaciones científicas y tecnológicas que le hacen aparecer como un elemento clave en el

desarrollo de la ciencia y la tecnología, tanto en nuestros días como para el futuro.

En la presente lección, se pasará revista a los fundamentos y posibilidades de las más significativas aplicaciones del láser como instrumento en las modernas tecnologías de fabricación, haciendo especial hincapié en aquellas que por su importancia industrial o estratégica suponen avances claros en los correspondientes procesos productivos y, en consecuencia, repercuten en el nivel de desarrollo tecnológico de sectores vitales de la industria civil o de la defensa nacional.

## **EL LÁSER COMO ELEMENTO CLAVE EN LAS MODERNAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN**

### **Principio de funcionamiento y propiedades fundamentales.**

Pero, ¿Qué es un LÁSER?

La palabra LÁSER es un acrónimo de la expresión original en lengua inglesa “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, que significa textualmente “Amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación”.

Un LÁSER consiste, por tanto, en una fuente luminosa basada en la emisión estimulada de radiación electromagnética por la materia en el rango visible (y, por extensión, en los rangos infrarrojo y ultravioleta cercanos), y está esencialmente caracterizada por sus propiedades de monocromaticidad, coherencia y elevada direccionalidad (coherencia espacio-temporal).

La citada emisión estimulada procede de la desexcitación de átomos o moléculas componentes de un medio activo inducida por la acción de fotones de una longitud de onda característica presentes en el mismo y que, mediante un efecto multiplicador, dan lugar a un elevado flujo de energía en forma fotónica cuya extracción del medio activo constituye lo que se conoce como un “haz láser”. De forma simplificada, una radiación electromagnética cuya frecuencia se halla en resonancia con la correspondiente a la transición entre dos niveles de energía del medio, da lugar a una emisión “estimulada” de radiación.

Para que la citada amplificación pueda tener lugar, es condición indispensable que un gran número de los citados átomos o moléculas del medio se encuentren en estado excitado, es decir, que la población electrónica del nivel de energía superior de la transición se encuentre abundantemente poblado con relación al nivel inferior de la misma, condición que se conoce con el nombre de “inversión de población”. Tal condición resulta fundamental para el desarrollo del proceso y sólo se puede obtener mediante la excitación selectiva del medio a través del adecuado procedimiento de “bombeo”.

Una vez conseguida dicha inversión de población, la realimentación causante de la multiplicación fotónica buscada sólo puede lograrse haciendo sufrir a una gran parte de los fotones nacidos de emisión estimulada sucesivos pasos a través del medio activo. Ello se consigue en la práctica situando dicho medio activo en una cavidad óptica cuya frecuencia de resonancia permita una interferencia constructiva entre todos los fotones viajeros en la misma que, de acuerdo con las leyes de la emisión estimulada, se encontrarán viajando paralelamente y en fase. De esta forma, la onda luminosa queda amplificada al seguir caminos de ida y vuelta en la cavidad y, al abandonarla por uno de sus extremos (constituido generalmente por un espejo parcialmente transparente), transporta la gran densidad de energía en fotones en idéntico estado de propagación que caracteriza a un haz láser.

Mediante variación del medio activo y del sistema de bombeo utilizados, pueden obtenerse los distintos tipos de láseres conocidos.

Pero, ¿Cuáles son las propiedades del láser que le confieren sus características altamente diferenciadas sobre las cuales se basa su empleo en las distintas aplicaciones?

Estas son, según se ha apuntado, su finura espectral (monocromaticidad), su coherencia (fotones en fase interfiriendo constructivamente) y su elevada direccionalidad (bajísima divergencia del haz que hace posible su transporte hasta grandes distancias conservando una gran parte de su energía original). Estas propiedades, utilizadas de una u otra forma, dan lugar a las distintas aplicaciones específicas en las que, con generalidad, el láser es capaz de sustituir con gran ventaja a elementos o herramientas convencionales en la realización de sus respectivos cometidos.

Así, la finura espectral de la luz láser resulta de especial interés en aplicaciones típicas como espectroscopía y excitación selectiva de materiales; la coherencia y direccionalidad resultan fundamentales en aplicaciones metrológicas; estas mismas características más la posibilidad de su transporte por fibra óptica resultan básicas en comunicaciones, aplicaciones de detección y el desarrollo de aplicaciones médicas; y la posibilidad de concentración de grandes flujos de energía coherente en pequeñas regiones del espacio constituye la base para el desarrollo de las aplicaciones industriales de procesamiento de materiales.

Por su parte, la capacidad de los láseres para producir pulsos intensos de radiación implica la posibilidad de muchas aplicaciones basadas en el calentamiento, fusión y vaporización de los materiales, siendo la característica fundamental del láser que permite su uso en el procesamiento de los mismos su capacidad de suministrar una muy elevada potencia por unidad de área a puntos muy localizados. Sólo los haces de electrones se pueden comparar con los láseres a este respecto, dado que la potencia total de una fuente térmica no es necesariamente tan importante como la capacidad de que dicha potencia pueda quedar enfocada sobre una pequeña región del espacio, dando lugar a una elevada densidad de potencia depositada. Dicha capacidad de “enfoque” da como resultado (altamente deseable) una minimización de la zona térmicamente afectada por el proceso, característica que confiere al láser un especial valor como herramienta de procesamiento de materiales.

### **Aplicaciones científicas y tecnológicas (una visión panorámica)**

A modo de muestra de las innumerables aplicaciones de carácter científico-técnico en las que el láser encuentra aplicación en nuestros días, citaremos algunas que ponen de manifiesto las peculiaridades de los distintos tipos de sistemas de amplificación de luz y sus propiedades específicas que les hacen especialmente útiles en cada caso.

Todo ello aparte de las aplicaciones específicas al procesamiento industrial de materiales, de las que nos ocuparemos en forma más detenida.

a) Espectroscopía y otras aplicaciones científicas.

Puede decirse con toda propiedad que la disponibilidad del láser en

la investigación en el campo físico-químico ha introducido modificaciones substanciales con relación a la época anterior a su descubrimiento.

En efecto, la sintonizabilidad asociada a la finura espectral de la emisión láser ha permitido el desarrollo en toda su potencialidad de una disciplina fundamental como la espectroscopía y diferentes técnicas asociadas: Las diferencias existentes entre los espectros de absorción de los distintos átomos y moléculas, que permiten su excitación selectiva mediante longitudes de onda de radiación concretas, constituyen la base para la detección, la reacción química y la separación física selectivas de especies atómicas y moleculares con láser, campo de gran desarrollo en la actualidad en el cual se enmarcan, por ejemplo, la separación de isótopos con láser, la detección de elementos contaminantes en la atmósfera, la detección, cuantificación y destrucción de productos químicos de gran toxicidad mediante fotólisis, el desarrollo de procesos fotobiológicos y otros.

#### b) Comunicaciones ópticas

Otro campo en el que el láser se ha mostrado como un elemento de desarrollo trascendental ha sido el de las comunicaciones: En efecto, la disponibilidad de emisores de luz coherente y monocromática estimuló, a raíz de la disponibilidad del primer láser en 1960, la exploración del espectro óptico como soporte de altos flujos de información, de manera que tuvo lugar el comienzo del desarrollo del empleo de las señales ópticas como medio de transmisión de información, hoy floreciente debido al empleo de fibras ópticas como medio para el guiado de dichas señales con importantes ventajas sobre los dispositivos transmisores de radiofrecuencia convencionales. El empleo de láseres en comunicaciones supone, hoy día, un elemento de suma importancia sobre cuya base tiene lugar el desarrollo de importantes aplicaciones, tales como la monitorización y maniobra en puntos remotos y con posible ambiente hostil, la transmisión de cantidades masivas de información en tiempos apropiados para su rápido procesamiento en computador, etc., todo ello aparte de las aplicaciones de carácter más convencional que están revolucionando, de hecho, este mundo en rápido desarrollo.



### c) Procesado y almacenamiento de información

Una tecnología cuyo desarrollo era impensable en el momento de la construcción del primer láser, que ha encontrado mercados masivos, y cuyo desarrollo ofrece excepcionales perspectivas en conexión con la revolución informática vivida en las últimas décadas, es la del procesado y almacenamiento de información basados en el empleo del láser, aplicaciones en las que se utilizan las propiedades de estos sistemas para leer, almacenar, recuperar y reproducir información en sustitución de dispositivos electromagnéticos convencionales, y de los que son ejemplos harto conocidos los lectores ("scanners") para la identificación de productos marcados con códigos de barras, los sistemas de audio y vídeo de lectura óptica, y las memorias ópticas de computadores en las que se basan los más modernos dispositivos de almacenamiento masivo de datos y programas. La importancia de todas estas aplicaciones en un marco tecnológico como en el que nos movemos, dominado por las tecnologías de la información, es más que manifiesta, y constituye un ejemplo claro de cómo la mera aparición en un momento clave de una tecnología como la relativa al desarrollo del láser ha potenciado, mediante un efecto altamente sinérgico, el desarrollo de tecnologías en principio de naturaleza bien distinta.

### d) Metrología, inspección y control

Un área que, asimismo, está sufriendo un fuerte impacto como consecuencia de la disponibilidad de los láseres, con sus propiedades características de monocromaticidad y coherencia, es el de la metrología y técnicas asociadas. En efecto, todas aquellas aplicaciones que puedan utilizar procesos de tipo interferométrico o basados en la dispersión de la luz láser como elementos de apreciación de magnitudes físicas (longitudes, deformaciones, velocidades, etc.), han visto mejorada de forma significativa su precisión con relación a la obtenida mediante el empleo de instrumentos ópticos convencionales, como consecuencia de la finura espectral y direccionalidad de dicha luz (ello cuando no se haya tratado de la definición de aplicaciones totalmente novedosas basadas en dichas propiedades).

Tal tipo de aplicaciones, de las cuales son, sin duda, las más importantes la metrología dimensional, el análisis de tensiones internas y defor-

maciones mediante interferometría holográfica y la velocimetría láser, ha visto incrementada su aplicación de forma sensible en los últimos años, de manera que los métodos ópticos de diagnóstico de propiedades y comportamientos mecánicos han de revestir una gran importancia en el futuro. Un ejemplo característico de este tipo de aplicaciones es el empleo de láseres visibles en velocimetría Doppler para la caracterización del flujo turbulento desarrollado en las proximidades de turbopropulsores ensayados en túneles aerodinámicos, y dos aplicaciones de suma importancia desde el punto de las tecnologías de fabricación son el control interferométrico de la precisión de las máquinas-herramienta y la metrología dimensional basada en láser de las piezas mecanizadas.

#### e) Aplicaciones a muy elevada energía

El desarrollo en los últimos años de sistemas láser capaces de concentrar sobre una pequeña región de un material elevadísimas densidades de energía en tiempos extremadamente cortos está propiciando, por su parte, la posibilidad para el desarrollo de importantes aplicaciones científicas de los láseres (sobre todo de aquellos de más corta longitud de onda) tales como el estudio de la materia sometida a condiciones extremas de presión y temperatura, cuerpo de doctrina que constituye la base para la comprensión de la dinámica estelar, y que permite aplicaciones tecnológicas como la generación de haces intensos de rayos X (de alto interés científico), y el desarrollo de sistemas de compresión de materiales ligeros hasta el logro de densidades y temperaturas apropiadas para el desarrollo de reacciones de fusión nuclear.

#### f) Aplicaciones médico-quirúrgicas

Mención aparte merecen las aplicaciones del láser en medicina y cirugía. De hecho, parecen ya innumerables las distintas aplicaciones que de las especiales propiedades del láser ha hecho uso la práctica médico-quirúrgica: Desde la inducción de ondas de choque o ataque directo para la eliminación de cálculos de riñón o vesícula biliar (litotricia) hasta la limpieza de arterias, parece que cualquier aplicación en que la precisión y densidad de potencia de un haz láser guiado por fibra óptica pudieran re-

sultar de interés haya sido fructíferamente explorada. De entre ellas, aplicaciones particularmente brillantes como la microcirugía ocular, la fotocoagulación endoscópica y la biopsia óptica por espectroscopía de fluorescencia merecen especial comentario.

#### g) Aplicaciones militares

Por su parte, las aplicaciones de carácter militar, en esencia no diferentes en fundamento al resto de aplicaciones consideradas, y que, en la práctica, suponen a nivel mundial una gran parte del volumen económico total de las actividades de investigación, desarrollo y aplicación relacionadas con los láseres, han sido, de forma tradicional, un importante motor para el desarrollo de los sistemas láser hoy día disponibles para su uso en aplicaciones civiles.

Entre las aplicaciones más conocidas de los láseres en este campo se encuentran los sistemas medidores de alcance de proyectiles, los indicadores (designadores) de blancos móviles y, en función de su importancia para el desarrollo de láseres de elevada potencia y elevada frecuencia, los célebres sistemas de armas de energía dirigida (componentes esenciales en la “Iniciativa de defensa estratégica” estadounidense). Como aplicaciones del máximo interés en el ámbito de las modernas tecnologías de fabricación, deben citarse en este punto la soldadura con láser de elementos acorazados (principalmente navales) y el corte y mecanizado con láser de elementos constructivos de aleaciones ligeras típicos de aplicaciones aeroespaciales.

#### **Aplicaciones al procesado industrial de materiales.**

En lo referido específicamente a la aplicación de los láseres al procesado industrial de materiales, se tiene que la industria actual de bienes de equipo, y especialmente la de manufacturas metálicas, se encuentra inmersa en un período de profunda mutación tecnológica, en la que una de las componentes básicas es la informatización integral de los procesos de producción: Tanto el diseño como la verificación y el control de los procesos de fabricación se realizan cada vez más con ayuda de computadores, de forma que la introducción de máquinas herramienta con control numérico aporta flexibilidad y aumenta la productividad en un mercado cada vez más competitivo. Y, de forma congruente a este tipo de transformación, la

incorporación de la tecnología láser va penetrando en el tejido industrial de los países con tecnología más avanzada, de manera que puede considerarse que, con toda probabilidad, tanto los láseres de potencia (típicamente utilizables en los procesos de mecanizado), como los utilizados en los campos de análisis de tensiones, metrología, velocimetría, etc., serán componentes esenciales en el equipamiento industrial de los años venideros.

En efecto, el número de sistemas láser de cierta potencia en funcionamiento en todo el mundo, puede estimarse en alrededor de los veinte mil, estando, en la mayoría de los casos, asociados a sistemas de presentación de piezas y/o manejo del haz según varios grados de libertad, programados por computador, y provistos de sensores y otros dispositivos optoelectrónicos integrados que permiten dirigir con altísima precisión potencias del orden de varios kilovatios en régimen continuo (y hasta teravatios en régimen pulsado), con ayuda de los cuales se pueden practicar taladros sumamente finos en los materiales de mayor dureza conocidos, cortes de formas arbitrarias en chapas de aceros, de aleaciones o de compuestos no metálicos especiales, soldaduras de piezas complicadas (incluso con materiales diferentes), tratamientos superficiales de endurecimiento de gran calidad, recubrimientos con metales resistentes a la corrosión de gran durabilidad, así como una gran variedad de tratamientos especiales muchas veces impracticables por otros métodos.

Todas estas operaciones se pueden poner en práctica, además, con gran versatilidad: Es posible, por ejemplo, utilizar un mismo láser para realizar con su ayuda en distintas estaciones de trabajo corte de chapa fina, taladros, marcado, soldadura por puntos, etc. O bien, con uno de mayor potencia, además de las operaciones anteriores, otras como soldadura continua (con espesores de hasta 20 cm en acero) o varios tipos de transformaciones superficiales (endurecimiento, fusión, aleaciones, nitruración, carburación, recubrimientos, etc.).

Aparte de las mejoras en precisión y rapidez de las correspondientes tareas permitidas por las elevadas densidades de potencia accesibles, la versatilidad de la herramienta tratada permite, de una forma esencialmente directa, su incorporación en los complejos sistemas industriales dotados de elementos robotizados para fabricación flexible, abre directamente la vía para la definición de procesos de tratamiento altamente individualizados

en cuanto a material, geometría y condiciones de procesado (pequeñas series, fabricación "just in time", introducción de pequeñas modificaciones en productos, etc.), difícilmente imaginables en cuanto a concepción desde el punto de vista de los procesos de fabricación con la tecnología hasta ahora convencional.

Debido a estas y otras consideraciones, la idea de futuro entre los responsables de los procesos productivos industriales en todo el mundo, fundamentada en el análisis del contexto económico-tecnológico previsible (en el que el coste de las materias primas ha de aumentar significativamente y las exigencias de calidad en los procesos se han de tornar altamente restrictivas, motivando su sustancial encarecimiento), recoge la implantación de la Tecnología Láser en los procesos de transformación de materiales como ciertamente importante.

a) Breve descripción fenomenológica de los procesos de interacción de la radiación láser de elevada intensidad con la materia en aplicaciones industriales de procesado

Pero, ¿Cuáles son los fenómenos que se desarrollan en la interacción del láser con la materia a elevadas intensidades de irradiación?

Cuando la radiación láser incide sobre la superficie de un blanco, parte de ella es absorbida y parte reflejada. La energía que es absorbida comienza a calentar la superficie, pudiéndose considerar varios regímenes de interés dependiendo de la escala de tiempo característica del proceso y de la potencia por unidad de superficie suministrada por el láser.

Así, por ejemplo, las pérdidas debidas a conducción térmica son pequeñas si la duración del pulso láser es muy corta, pero pueden ser importantes para pulsos más largos. Asimismo, puede haber importantes efectos debidos a la absorción de radiación en el vapor y plasma formados sobre la superficie del blanco, siendo la consideración de este efecto (que sólo aparece a intensidades elevadas) importantísima a la hora de predecir la capacidad de absorción real por el material de la energía suministrada por el haz láser.

Los efectos de calentamiento debidos a la absorción de la energía de haces láser de elevada potencia pueden ocurrir muy rápidamente, sobre todo si las densidades de potencia suministradas son muy elevadas. La

superficie objeto de irradiación rápidamente se calienta hasta la temperatura de fusión del material, siendo esta fusión de fundamental interés en aplicaciones de corte y soldadura.

Para intensidades inferiores a  $10^6$  W/cm<sup>2</sup>, la incidencia de un haz láser sobre un material provoca solamente el calentamiento de su superficie sin fundirla ni vaporizarla: La fracción absorbida de la energía lo ha sido en una profundidad muy pequeña del material y es transportada hacia el interior del mismo mediante un mecanismo de conducción térmica que en ningún caso supone la elevación de la temperatura del material hasta valores que impliquen su fusión o vaporización, aunque sí, muy probablemente, una transformación de su estructura cristalina en estado sólido.

Sin embargo, a medida que la intensidad energética del láser se hace mayor, transformaciones de mayor envergadura van siendo posibles en la superficie y en el seno del material: Éste puede resultar fundido y vaporizado, e incluso ionizado, dando lugar a un plasma de relativamente elevada densidad que absorbe por sí mismo la radiación láser incidente y que puede, en función de las condiciones del proceso, bien mejorar la absorción de dicha radiación incidente por el material, o bien apantallararlo frente a ésta.

La rápida elevación de temperatura propiciada resulta, entonces, en una ablación del material fundido y vaporizado hacia el haz incidente, proceso que da lugar, a su vez, a una reacción hidrodinámica que se transmite a la parte condensada del material. Para intensidades del haz láser por encima de  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>, este efecto resulta de la mayor importancia y constituye la base para el tratamiento de endurecimiento superficial por ondas de choque inducidas por láser.

Pero, pasemos a la descripción sucinta de las más importantes aplicaciones de los láseres en el área del procesado industrial de materiales, a saber, taladrado, corte, soldadura y tratamientos superficiales.

#### b) Procesos industriales de taladrado con láser

Una de las primeras aplicaciones industriales del láser al procesado de materiales fue la realización de taladros de 30  $\mu$ m de diámetro en piezas de relojería. Desde entonces, el taladrado con láser, manejando diámetros de entre 0,01 y 1 mm, se ha convertido en una de las técnicas más impor-

tantes de procesado de materiales resistentes a altas temperaturas, aceros, superaleaciones, wolframio, molibdeno y materiales cerámicos. A la pregunta ¿Que tienen hoy día en común un reloj de calidad y un automóvil de una marca suficientemente acreditada? podríamos responder que, aparte de las posibles analogías mecánicas, ambos incorporan elementos de precisión taladrados con ayuda de un láser.

El taladrado de materiales con láser se lleva generalmente a cabo en modo pulsado al objeto de evitar procesos indeseables de conducción térmica y utilizando preferentemente láseres de estado sólido de Nd:YAG de elevado ritmo de repetición o láseres de CO<sub>2</sub>. Las elevadas densidades de potencia de estos láseres son capaces de fundir y vaporizar prácticamente cualquier material, incluso si éste presenta inicialmente alta reflectividad.

En la práctica, el proceso de taladrado con láser se lleva a cabo con asistencia de gas reactivo, que ayuda vía reacción exotérmica en el proceso de calentamiento del material hasta su vaporización, y de gas de soplado, que ayuda a la eliminación de material fundido.

Sin embargo, últimamente, con el desarrollo de los láseres de excímero, capaces (en función de su elevado grado de acoplamiento con gran precisión al material objeto de tratamiento) de eliminar la parte seleccionada de éste mediante un mecanismo de foto-ablación, la técnica del taladrado de materiales ha podido extenderse a dimensiones características de taladro del orden de 1  $\mu\text{m}$  sobre los más diversos materiales, con formas arbitrarias, y sin necesidad de aporte exotérmico alguno, lo cual supone un gran avance en el campo al poderse obtener taladros o, en general, volúmenes vaciados de superficie interior perfectamente limpia .

### c) Procesos industriales de corte con láser

El corte de materiales con láser consiste, fundamentalmente, en la fusión/vaporización de una estrecha franja de los mismos mediante el movimiento relativo de la pieza en cuestión bajo un haz láser convenientemente enfocado.

Como en el caso del taladrado (y en general de todas las aplicaciones del láser en procesado de materiales), han de ser utilizados láseres de elevada potencia (CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, excímero), ya en régimen continuo, ya en régimen pulsado en función de las propiedades de difusividad térmica del

material, y al objeto de minimizar la zona térmicamente afectada por el proceso.

Los parámetros fundamentales del corte con láser, además de la naturaleza y espesor del material a cortar, son la posición del punto focal del láser con relación a la superficie de la pieza, la densidad de potencia del láser, la velocidad relativa de movimiento de la pieza con respecto al láser y la presión y gasto de gases reactivos e inertes (como se observa un conjunto de parámetros en modo alguno despreciable, pero que, una vez obtenidos, quedan fijos para cada tipo concreto de aplicación). A la hora de combinar dichos parámetros con vistas al diseño del proceso en sí, la cuestión fundamental radica en el ajuste adecuado de los balances de masa, impulso y energía en el proceso, de manera que queden evitadas inestabilidades que den como consecuencia imperfecciones indeseables en el corte.

Como dato orientativo, un láser de una potencia intermedia (varios kW) permite el corte de espesores de hasta 10-12 mm de materiales metálicos (incluidos aceros de alta reflectividad) a una velocidad de varios metros por minuto, obteniéndose excelentes resultados en aceros al carbono de baja aleación, zircalloy, titanio, molibdeno y materiales cerámicos, y pudiéndose gobernar fácilmente el proceso de corte mediante los adecuados sistemas de CAD-CAM que controlen las velocidades de movimiento de las piezas objeto de corte bajo el haz láser.

#### d) Procesos industriales de soldadura con láser

La soldadura con láser ha alcanzado en nuestros días, y en función de su desarrollo desde hace ya varios años, un elevado de desarrollo que permite su aplicación tanto a escala microscópica en la soldadura por puntos de pequeños componentes y circuitos integrados a elevados ritmos de producción, como en el límite superior de la soldadura de espesores de hasta varios centímetros de materiales metálicos (típicamente aceros) con láseres de gran potencia.

El proceso de soldadura, aplicación, por tanto, de suma importancia de la Tecnología Láser en nuestro entorno tecnológico, puede considerarse, en lo referido a caracterización física, como un procedimiento inverso al de corte, en el que se utiliza la potencia del láser para fundir (en princi-



pio sin aportación de material externo) una franja de material que contiene la superficie de separación entre las dos partes a soldar, de manera que, tras la resolidificación de dicho material, dichas partes queden metalúrgicamente unidas. Ello permite un máximo de fiabilidad en la unión debida a la formación de una única estructura cristalina sin la perturbación introducida por posibles materiales de aporte, así como una minimización efectiva de la zona térmicamente afectada por la unión (altamente deseable) en función de la precisión de enfoque del haz.

Como puede deducirse de esta descripción fenomenológica del proceso de soldadura, para la realización efectiva de dicho proceso, se hace necesario que todos los puntos de la superficie de separación entre las partes a soldar lleguen a un estado fundido que permita la resolidificación del conjunto como una única especie metalúrgica. Para el logro de dicha situación se hace necesario que el haz láser utilizado sea capaz de proporcionar su energía hasta la profundidad más interna de dicha superficie, circunstancia para la cual resulta necesaria la formación de una zona de material fundido en torno a una línea de penetración del haz láser en el material (denominada “canal de absorción” o “keyhole” en denominación inglesa), cuyo movimiento relativo a lo largo de la superficie de separación de las partes a soldar propicia la unión de estas.

En cuanto a disposición práctica, el proceso de soldadura con láser se puede asimilar perfectamente al de corte: El láser (ya estático, ya en movimiento por efecto de un sistema robotizado) se mueve con relación al conjunto de las piezas a soldar a lo largo de una línea externa de su superficie de separación, de manera que la zona de material fundido va adquiriendo posiciones sucesivas sobre la misma sin solución de continuidad hasta la finalización del proceso.

De forma semejante al caso del corte, los parámetros definitorios de una aplicación de soldadura de materiales con láser son la densidad de potencia aportada por el haz, la profundidad de la soldadura, la situación del foco del haz con relación a la superficie externa de las piezas (junto con el diámetro resultante del haz sobre dicha superficie), y la velocidad relativa de movimiento del haz con respecto a la pieza (velocidad de soldadura).

Al igual que en aquel caso, los balances de masa, impulso y energía en el proceso deben estar convenientemente ajustados al objeto de evitar

inestabilidades indeseables. Pero, según lo descrito, a diferencia del caso del corte, en el caso de la soldadura de grandes espesores con láser (que requiere, en general, más elevadas densidades de potencia), aparece un fenómeno adicional con decisiva influencia en los citados balances: La generación de una nube de vapor parcialmente ionizado (plasma) entre el haz láser y la superficie de las piezas a soldar.

Dicha nube de vapor ionizado condiciona decisivamente la dinámica del proceso de fusión-vaporización del material objeto de soldadura, pudiendo, bien potenciar el acoplamiento del láser al mismo, bien apantallar indeseablemente al mismo, restando eficiencia al proceso, de manera que el adecuado control de dicha dinámica se hace esencial para el desarrollo correcto de la aplicación.

En lo referido a requerimientos de la fuente láser empleada, para la soldadura de materiales metálicos de grandes espesores se requieren densidades de potencia del orden o superiores a  $1 \text{ MW/cm}^2$ , las cuales sólo pueden ser suministradas por grandes láseres con potencias del orden de varios kW.

Sin embargo, desde un punto de vista práctico, la soldadura con láseres de elevada potencia es una aplicación fundamental de esta tecnología y está siendo aplicada a un gran número de situaciones con gran ventaja sobre las técnicas convencionales de soldadura.

e) Procesos industriales de tratamiento superficial de materiales con láser

El fundamento de los procesos de tratamiento superficial de materiales con láser consiste en la modificación de la estructura metalúrgica superficial de los materiales al objeto de conferirles propiedades especiales en lo relativo a dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, etc., tratándose, en definitiva, de procesos similares a los convencionales de temple, fusión superficial, recubrimiento superficial, aleación superficial, endurecimiento por choque, etc.

Las potencialidades brindadas por las fuentes láser de potencia permiten la realización de todos estos procesos con un máximo de sencillez, eficacia y fiabilidad, permitiendo, además el tratamiento específico y de forma selectiva sólo de aquellas zonas del material en las cuales sea requerido el tratamiento.

Así, por ejemplo, en el proceso de tratamiento térmico superficial, utilizado sistemáticamente en la industria automotriz para el endurecimiento superficial de levas, cabezas de biela y otros elementos sometidos a desgaste, el haz láser se pasa con el diámetro de haz y velocidad adecuados para que tengan lugar las transformaciones metalúrgicas perseguidas en un pequeño espesor de material cercano a su superficie, de manera que el resto del material componente del elemento tratado quede totalmente inalterado.

Asimismo, en el proceso de recubrimiento o aleación superficial con láser, se usa la potencia de éste para fundir el material aportado en unión con un pequeño espesor del material objeto de tratamiento, de forma que quede suficientemente bien instalado el material de recubrimiento tras su resolidificación, o bien incorporado químicamente el metal aleado. De este modo, es posible conseguir de forma eficiente, y con un mínimo de energía puesta en juego, procesos metalúrgicos que, realizados de forma convencional, resultarían de un costo en muchos casos prohibitivo. De hecho, los procedimientos de aleación y recubrimiento superficial con láser se están extendiendo hoy día a aplicaciones difícilmente imaginables desde el punto de vista de los procedimientos convencionales.

## RECAPITULACIÓN

Una vez vistos los procesos más significativos de aplicación del láser al procesado industrial de materiales, podríamos, evidentemente, seguir describiendo el sinnúmero de aplicaciones que hoy día se conciben en los campos más variados para tan sutil herramienta (ni el más imaginativo ingeniero podría haber concebido, en efecto, que pudiera ser la simple luz un elemento que superase ampliamente en su poder a los más duros y resistentes materiales).

Sin embargo, esto nos llevaría a un larguísimo camino que, no recorreremos hoy con el ánimo de no abrumar a tan paciente audiencia.

Quedémonos hoy, no obstante, con la idea de la gran importancia que en nuestros días (y asimismo con vistas al futuro) reviste el láser como elemento fundamental no sólo en las modernas tecnologías de fabricación,

sino en un amplio conjunto de aplicaciones que le configuran como un verdadero elemento clave en la ciencia y tecnología.

Y pensemos, además, que corresponde fundamentalmente a nosotros, ingenieros, la utilización de tan sobresalientes propiedades en nuestras respectivas posibles áreas de aplicación. Hagámoslo siempre con el objetivo último de beneficio, progreso y desarrollo armónico de la Humanidad.

Emulemos en este camino la figura del insigne Jorge Juan y contribuyamos con nuestro esfuerzo cotidiano a dotar a nuestros semejantes, para hoy y para el futuro, con elementos valiosos sobre los que apoyar dicho desarrollo.