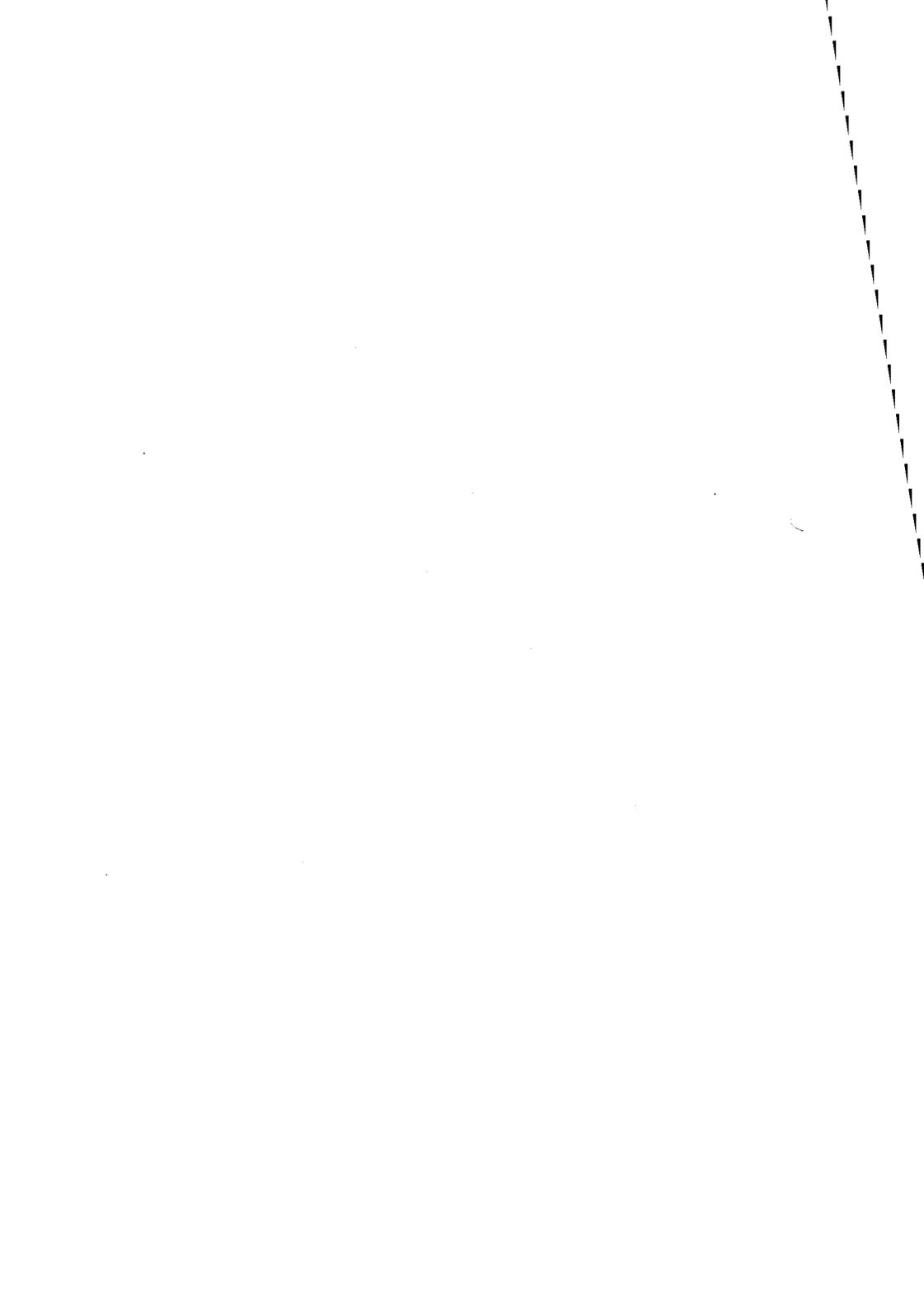


APLICACIONES DE LOS LÁSERES DE POTENCIA EN LAS MODERNAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN

José Luis Ocaña Moreno
Catedrático de Ingeniería Mecánica
Escuela Politécnica Superior de Ferrol



I. 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 una adecuada 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, asimismo, 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 la tecnología tratada con vistas al futuro.

De forma similar a otros aspectos clave configuradores del estado actual de la tecnología, como el desarrollo de la robótica, la inteligencia artificial, el relativo al uso de nuevos materiales y el relati-

vo a la concepción integrada de los procesos de fabricación, la introducción de *tecnología láser* en el mundo productivo ha supuesto un hito sin precedentes, precisamente 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 lo 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 ponencia 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.

II. LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN EN UN ENTORNO FUERTEMENTE COMPETITIVO Y AUTOMATIZADO.

Con motivo de las más recientes crisis económicas, en todo el mundo la población general de máquinas-herramienta ha alcanzado un elevado grado de antigüedad (a veces obsolescencia), y, desde

hace tiempo, se viene haciendo notoria la necesidad de una renovación de los equipos, la cual será forzada en último término de forma imperiosa por las recientes regulaciones medioambientales a nivel mundial (que forzarán a muchas compañías a reconfigurar y reinstrumentar muchas de sus operaciones) y por la creciente falta de personal profesionalmente adiestrado (que forzará a muchas empresas a adoptar procesos productivos con un alto grado de automatización).

Sin embargo, la industria de las máquinas-herramienta, pilar clásico fundamental de las tecnologías industriales de fabricación, no es un caso aislado en el seno de la industria en general, y responde, como ésta, a la tendencia motora generalizada de “producción más rápida y mejor calidad de fabricación”.

Ante esta clara consigna, derivada de la necesidad de logro de una mayor competitividad en el mundo de los procesos de fabricación, una primera reacción del citado sector fue la de tender hacia mayores velocidades de mecanizado. Pero este cambio requería de una “revolución” más que de una “evolución” del estado de la tecnología, pues requería tanto un nuevo diseño del instrumental como un cambio en la filosofía de operación (no había forma práctica de “ir un poco más deprisa”).

Desde un punto de vista tecnológico, dicho cambio requería, en esencia, el sacrificio del corte de material a baja velocidad, pero con grandes pares de mecanizado, en beneficio de mayores velocidades de corte de material, aunque con menores pares. Por ejemplo, las velocidades convencionales de rotación de las máquinas-herramientas hace cinco años eran de alrededor de 1.600 r.p.m., mientras que en la actualidad pueden rotar a más de 12.000 r.p.m.

La ventaja evidente era un mayor ritmo de producción, debido a una mayor velocidad de los procesos, mejores calidades de acabado y menores necesidades de operaciones secundarias; pero, por el contrario, el logro de dichas velocidades de giro de las herramien-

tas requería del desarrollo de motores más rápidos, elementos de mecanizado más ligeros y controles de herramienta más complejos.

Tal cambio se ha materializado, de hecho, en los últimos años, y, en la práctica, la necesidad de una producción más rápida se ha aplicado a la propia producción de máquinas-herramienta.

Como una constante en el mundo de la ingeniería, el desarrollo integrado de proyectos está reemplazando poco a poco al estilo segmentado y secuencial, siendo, hoy día, la llamada “ingeniería concurrente” un concepto de amplia implantación en la generalidad de los ambientes de desarrollo tecnológico: en lugar de pasar un proyecto de departamento a departamento (diseño conceptual, ingeniería de detalle, producción), las tendencias recogen una interdependencia y realimentación permanente entre las diversas fases de desarrollo antes de que el producto salga al mercado, procedimiento mediante el cual se minimizan las actividades de rediseño, los errores de producción y el tiempo total de salida del producto.

El mundo del desarrollo y aplicación de las máquinas-herramienta como elementos básicos en las tecnologías de producción no es una excepción respecto a tal tendencia, y, de forma consecuente, no sólo son las máquinas las que se están tornando más rápidas en función de un aumento de la velocidad neta de sus distintos movimientos, sino que la velocidad global de mecanizado se está viendo aumentada, como consecuencia de una mayor “flexibilidad” de las mismas, para permitir la interrelación de las diversas fases de fabricación en la forma descrita.

En efecto, cuando se aplica a una máquina-herramienta la palabra “flexibilidad” es un sinónimo de “versatilidad”: siendo flexibles, las máquinas pueden realizar más funciones en una única posición de trabajo. Por ejemplo, la misma máquina puede fresar, taladrar y amolar, y ello reduce, en definitiva, el tiempo necesario para reequipar una máquina para un nuevo trabajo, así como el tiempo requerido para la transferencia de piezas entre máquinas.

Pues bien, la tendencia más reciente en el diseño de máquinas ha sido el paso desde la máquina de función única a su equipamiento para la realización de tareas múltiples.

En efecto, en los primeros días de la tecnología de mecanizado, la producción era marcadamente lineal, es decir, el torneado se hacía en la “sección de torno”, y todo el fresado, en la “sección de fresado”. La producción se volvió rápida con la línea de producción automatizada, pero la progresión era aún lineal: las piezas se movían de estación de trabajo a estación de trabajo, y, en cada estación, una máquina de un solo proceso hacía su parte del trabajo total. Finalmente, el énfasis se ha puesto en la posibilidad de realizar más trabajos en cada máquina y de integrar máquinas con funciones diferentes.

La clave de la flexibilidad o versatilidad de cualquier máquina radica en el número de ejes o planos según los cuales puede operar: el número de ejes de movimiento determina las formas en que la herramienta puede ser posicionada con relación a la pieza de trabajo (a mayor número de ejes, obviamente mayor versatilidad).

En efecto, el número de ejes de una máquina determina la facilidad con que la herramienta puede aproximarse a la pieza en una operación de ejes y el número de veces que la pieza ha de ser reposicionada a la largo de su paso por el taller.

La mayoría de las máquinas-herramientas vendidas hoy día operan según tres ejes mutuamente perpendiculares, siendo comunes las máquinas con un cuarto o quinto ejes, y utilizándose máquinas de seis o más ejes sólo en casos muy especiales.

Por otra parte, el desarrollo de controles electrónicos cada vez más sofisticados ha permitido a las máquinas responder a un número creciente de comandos secuenciados, haciendo posible una coordinación efectiva de los conjuntos de movimientos requeridos, siendo ésta una tendencia que continúa, posibilitando máquinas

capaces de realizar un amplio conjunto de operaciones concatenadas (fresado, torneado, taladrado, vaciado, amolado, etcétera).

De esta forma, las denominaciones clásicas de las máquinas cada vez revisten menos importancia, y el hecho notable es que cada empresa suministradora emplea su propia jerga de términos acuñados, caracterizadores de configuraciones mecánicas capaces de realizar un conjunto dado de operaciones (si bien, por supuesto, las funciones básicas pueden aún ser definidas). Incluso se diseñan y comercializan máquinas “universales” de mecanizado.

Otro punto de progresión en el desarrollo de las tecnologías de fabricación con máquinas-herramienta concierne a los materiales utilizados en los distintos útiles (todo ello como consecuencia del cambio habido en lo relativo a la velocidad de mecanizado, según lo apuntado en párrafos precedentes): en las primeras máquinas, la herramienta era una pieza de acero duro; más tarde, los elementos cortantes de acero duro se unían solidariamente a la herramienta; hoy día, la mayoría de los elementos cortantes consisten en un accesorio cerámico o de acero duro fijado al cuerpo de la herramienta.

Para finalizar esta visión rápida del estado actual del mundo de las tecnologías de fabricación, y de las máquinas-herramienta en particular, diremos que una de las limitaciones que en los últimos tiempos ha venido impuesta al desarrollo de la industria actual de las citadas máquinas ha sido la falta de normalización a la hora de caracterizar y sistematizar los nuevos e importantes desarrollos, dado que los criterios de normalización tradicionalmente vigente se han mostrado incapaces de incorporar las muchas y sustanciales mejoras introducidas por los nuevos desarrollos (tanto la oficina de normalización alemana, DIN, como la japonesa, JIS, dos de las tres más importantes en cuanto al desarrollo de nuevas tecnologías de producción, caracterizan aún las máquinas-herramienta en función de sus posibilidades eje a eje, y no contemplan, en función de la

dificultad inherente a tal cometido, las capacidades añadidas por la disponibilidad conjunta de varios ejes trabajando sobre la misma pieza).

La situación venía agravada por el hecho de que los fabricantes individuales de máquinas-herramienta han seleccionado, con generalidad, sus propios criterios para caracterizar las prestaciones de sus equipos, con lo que una intercomparación fiable entre equipos de distintos fabricantes en cuanto a dichas prestaciones resulta hoy día de gran dificultad.

Sin embargo, la solución a este problema está hoy día en curso, tras la publicación en 1993, por parte del National Institute of Standards and Technology estadounidense (NITS), de la norma ASME B5.54 (“Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers”), cuyo principal mérito es el proporcionar un método para la comparación de las prestaciones de las diversas estaciones de mecanizado controladas por computador, ayudando así al diseñador de nuevas máquinas a tener una estimación directa del mérito comparado de los nuevos equipos, así como proporcionar a las industrias usuarias una guía fiable para la valoración de los distintos equipos del mercado.

Pues bien, en vista de este panorama tecnológico, en el que cada vez hace más notorio el problema de la falta de personal cualificado y cobran importancia creciente cuestiones relativas a la necesidad de mayores precisión y calidad (metrológicamente controlables) en el mecanizado, sobre todo en procesos de fabricación microscópicos, y a la necesidad de mayores grados de flexibilidad en la fabricación, la idea de futuro entre los responsables de los procesos productivos industriales, 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 tomar altamente restrictivas, encareciéndolos asimismo de manera significativa), recoge la im-

plantación de la *tecnología láser* en los procesos de transformación de materiales como ciertamente importante.

La razón básica para ello estriba en la posibilidad de incorporación esencialmente directa del láser en los complejos sistemas industriales dotados de elementos robotizados para fabricación flexible, que abre directamente la vía para la definición de procesos de tratamiento altamente individualizados en cuanto a material, geometría y condiciones de procesado difícilmente imaginables en cuanto a concepción con ayuda de las herramientas hasta ahora convencionales.

III. EL LÁSER COMO ELEMENTO CLAVE EN LAS MODERNAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN.

1) Principio de funcionamiento y propiedades fundamentales.

La palabra LÁSER es un acrónimo de la expresión en lengua inglesa "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", que indica el modo de generación de haces de luz mediante este tipo de dispositivos.

Por tanto, un láser es una fuente luminosa basada en la emisión estimulada de radiación eselectromagnética (en rigor, en el rango visible y, por extensión, en los rangos infrarrojo y ultravioleta cercanos) por la materia, 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 sistemas cuánticos (átomos, 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 fotóni-

ca, 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 sistemas cuánticos componentes 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 óptico”.

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 característica de un haz láser.

En la figura 1 se muestra un esquema simplificado del funcionamiento de una cavidad láser (en el caso de la figura, con un medio activo gaseoso); en la figura 2 se muestra la configuración típi-

ca de un láser de rubí, el primero en ser construido, y en la figura 3 se muestra el esquema constructivo de un láser industrial de CO_2 de flujo transversal, tipo de láser ampliamente utilizado en procesos de fabricación.

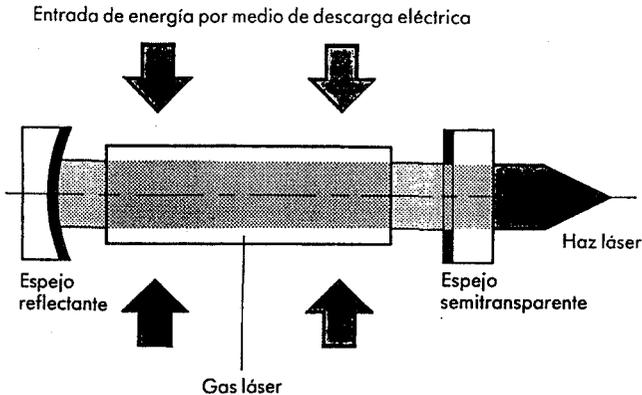


Figura 1. Esquema simplificado de una cavidad láser con medio activo gaseoso (típica de un láser de CO_2 de flujo transversal). Cortesía de TRUMPF.

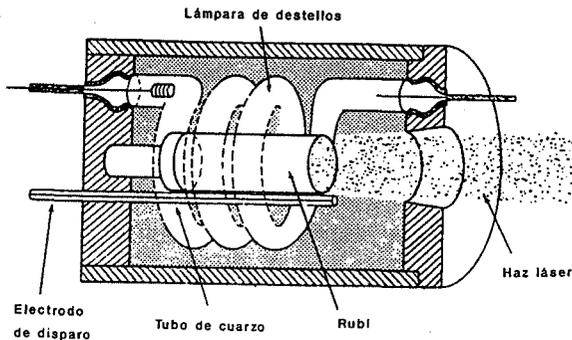


Figura 2. Esquema simplificado de un láser de Rubí

Mediante variación del medio activo y del sistema de bombeo utilizados pueden obtenerse los distintos tipos de láseres conocidos. En la tabla I se recogen las diferentes posibilidades de bombeo del

medio activo y en la tabla II se recogen las características de los tipos de láseres más importantes en relación con las diferentes aplicaciones.

Tabla I. Clasificación de los distintos tipos de láseres, atendiendo al procedimiento de bombeo del medio activo y a la naturaleza de este

Tipo de Bombeo	Medio Activo	Ejemplos	
Óptico	Cristal	Rubi, Nd:YAG	
	Líquido	Colorante	
	Gaseoso	I ₂	
Descarga eléctrica	Sólido Semiconductor	GaAs	
	Gaseoso:	atómico	He-Ne, He-Cd, Cu
		iónico	Ar ⁺ , Kr ⁺
		molecular	CO ₂ , N ₂
excímero	KrF		
Choque térmico	Gaseoso	CO ₂ -N ₂ -H ₂ O	
Reacción química	Gaseoso	HF	
Reacción nuclear	Gaseoso	He-Hg	
Campo magnético		Electrones libres	
Láser de potencia	Plasma	Rayos X	

Las propiedades del láser que le confieren sus características altamente diferenciadas sobre las cuales se basa su empleo en las distintas aplicaciones son, como se han apuntado, su finura espectral (monocromaticidad), su coherencia (fotones en fase interfiriendo constructivamente) y su 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.

Tabla II. Características de los principales tipos de láseres

Tipo de láser	Modo oper. (C/P)	Long. onda (nm)	Pot. media (W)	Pot. pico (kW)	Duración pulso (ms)	Efic. %
Rubí	P	694.3	1	10-10 ⁴	10 ⁻⁵ -1	<0.1
Nd:YAG	C	1064	150			1-3
Nd:YAG	P	1064	400	10	1-5	1-3
Nd:YAG	P	1064	4	2.10 ⁴	1-2.10 ⁻⁵	1-3
He-Ne	C	632.8	10 ⁻³ -10 ⁻²			
Cu	P	510.5	40	100	2-4.10 ⁻⁵	1
Ar ⁺ C	514.5	10-150				<0.1
He-Cd	C	325	10 ⁻¹			
CO ₂	C	1,06.10 ⁴	1-15.10 ³			10-
CO ₂	P	1,06.10 ⁴	10 ³	10 ⁴	1-5.10 ⁻⁴	10
KrF	P	248	100	5.10 ³	10 ⁻⁵	1
Rhod-6G	P	590	100	100	10 ⁻³	0.5
HF	C	2,6-3,3.10 ⁴	10 ⁴			
HF	P	2,6-3,3.10 ⁴	10 ³			
GaAs	C	840	10 ⁻²			10

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 la direccionalidad resultan fundamentales en aplicaciones metrológicas; dichas 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.

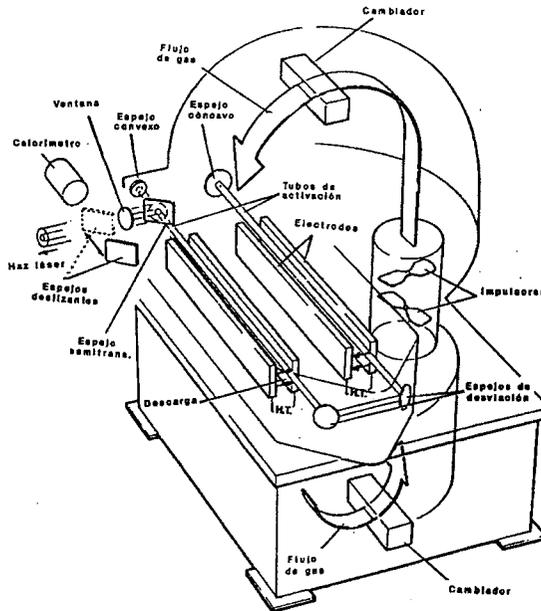


Figura 3. Esquema de un láser de CO_2 de flujo transversal

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 procesado de materiales, su capacidad de suministrar una muy elevada potencia, por unidad de área, a puntos localizados del material. 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 “enfoco” da como resultado (altamente deseable) una minimización de la zona térmicamente afectada por el proceso característico que confiere al láser un especial valor como herramienta de procesado de materiales.

2) 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, aparte de las aplicaciones específicas al procesado industrial de materiales, de las que nos ocuparemos en el punto siguiente:

a) Espectroscopia 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 sustanciales 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 espectroscopia 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 selectiva, la reacción química selectiva y la separación física selectiva 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 transcendental 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, etcétera, 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 cuya evolución 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 (tanto de lectura como de escritura), 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 las del desarrollo de láseres 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 técnica 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, etcétera), 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 deformaciones 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 diagnosis de propiedades y comportamientos mecánicos han de revestir una gran importancia en el futuro. Un ejemplo característico de este tipo de aplicaciones en el empleo de láseres visibles en

velocimetría Doppler para la caracterización del flujo turbulento, desarrollado en las proximidades de turbinas de turbopropulsores ensayados en túneles aerodinámicos, y dos aplicaciones de suma importancia desde el punto de vista del marco general en el que la presente ponencia se enclava, son el control interferométrico de la precisión de las máquinas-herramienta y la metrología dimensional basada en láser de las piezas mecanizadas (aplicaciones cuya importancia se analizará con mayor profundidad en párrafos posteriores).

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, 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 (litroticia) 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 resultar de interés, haya sido fructíferamente explorada. De entre ellas, aplicaciones particularmente brillantes, como la microcirugía ocular, la fotocoagulación edoscópica y la biopsia óptica por espectroscopia de fluorescencia merecen especial comentario.

g) Aplicaciones militares

Este tipo de aplicaciones, 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), y como de máximo interés desde el punto de vista del marco en el que se encuadra la presente ponencia, se consideran, por ejemplo, la soldadura con láser de elementos acorazados, principalmente navales, y el corte y mecanizado con láser de elementos constructivos de aleaciones ligeras típicas de aplicaciones aeroespaciales.

3) Aplicaciones al procesamiento industrial de materiales

Como resumen de las reflexiones apuntadas en párrafos precedentes, puede concluirse que la industrial 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 la misma forma, paralelamente a este tipo de transformación, otro elemento modificante de gran importancia, 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, etcétera, 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 opto-electrónicos integrados, que permiten dirigir con altísima precisión potencias del orden de varios kilovatios en régimen continuo, y hasta teratios 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 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, etcétera. O bien, con un de mayor potencia, además de las operaciones anteriores, otras, como soldadura continua (con espesores de hasta 20 centímetros) en acero o varios tipos de transformaciones superficiales (endurecimiento, fusión, aleaciones, nitruración, carburación, recubrimientos, etcétera).

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 (facilidades para la implantación de “ingeniería concurrente” en procesos de fabricación) difícilmente imaginables en cuanto a concepción desde el punto de vista de los procesos de fabricación con la tecnología hasta ahora convencional (a pesar de los avances y tendencias comentados en el epígrafe II):

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 continuación, y tras una breve y simplificada introducción a la física de los procesos de interacción de la radiación láser con la materia a elevadas intensidades (base necesaria para la comprensión de los a veces sutiles mecanismos puestos en juego en determinadas aplicaciones), se tratarán de forma individualizada (y, por supuesto, sin ánimo exhaustivo) algunas de las aplicaciones más importantes de la tecnología láser a actividades industriales de procesado de materiales en procesos de fabricación.

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

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 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 (intensidades) suministradas son muy elevadas. La superficie objeto de irradiación rápidamente se calienta, hasta la temperatura de fusión del materia,

siendo esta fusión de fundamental interés en aplicaciones de corte y soldadura.

Para intensidades inferiores a 10^6 W/cm^2 , 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. Este 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 de haz láser por encima de 10^9 W/cm^2 , este efecto resulta de la mayor importancia y constituye la base para el tratamiento de endurecimiento superficial por ondas de choque inducidas por láser.

Como resumen de las posibilidades brindadas en cada caso por la interacción del láser con la materia, según distintas escalas de tiempo y niveles de intensidad de pulso, en la figura 4 se recogen, sobre un diagrama intensidad de haz láser-tiempo de interacción, los posibles efectos causados por la radiación láser al incidir sobre

los materiales con vistas al desarrollo de las diferentes aplicaciones de procesado.

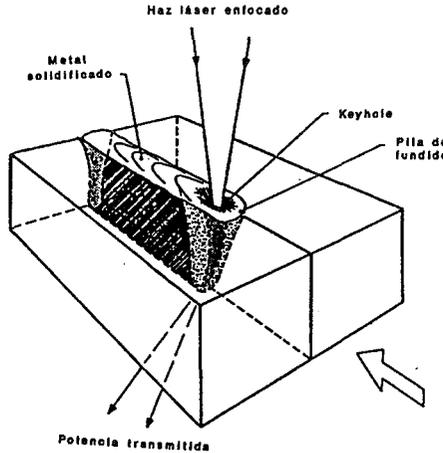


Figura 4. Representación esquemática del proceso de soldadura con láser

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 μm . 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 importantes del procesado de materiales resistentes a altas temperaturas: aceros, superaleaciones, wolframio, molibdeno y materiales cerámicos. Especial mención merecería, asimismo en este campo, la práctica del sinnúmero de taladros característicos de las estructuras aeronáuticas, y que, en la práctica, son realizadas con la ayuda de láseres mediante un proceso de corte.

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 CO₂. 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 de 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 fotoablación, la técnica del taladrado de materiales ha podido extenderse a dimensiones características de taladro del orden de 1 μm . sobre los más diversos materiales con forma 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 (ver figura 5).

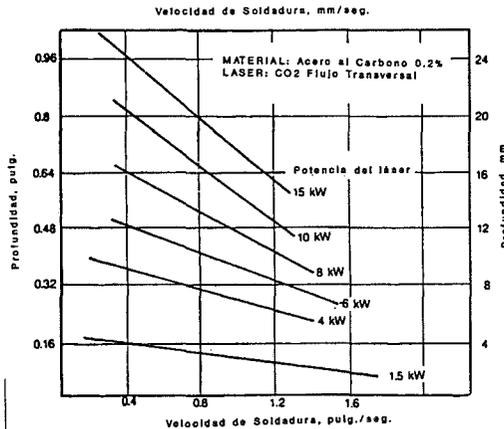


Figura 5. Diagrama de velocidades típicas de soldadura de acero al carbono con láser de CO2 en función del espesor de material soldado, para varias potencias características de haz láser.

Fuente: Industrial Láser Annual Handbook, Belforte & Levit. Eds., 1999.

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 procesamiento de materiales), han de ser utilizados láseres de elevada potencia (CO₂, 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.

En el caso de utilización de láseres de CO₂ o de Nd:YAG, el proceso de corte se ha de concebir de forma asistida, tanto por gas reactivo como por gas de arrastre, y de protección de material no fundido (presiones de entre 2 y 5 bar), de manera que el material que va siendo fundido al paso del frente del haz láser pueda ser convenientemente expulsado de la zona de corte, sin formación de rebabas indeseables. En la figura 6 se muestra, esquemáticamente, la configuración de un sistema típico de corte con láser, y en la figura 7 puede observarse una representación esquemática del proceso de corte, en la que se muestran las zonas materiales de interés y su interrelación con el haz láser incidente.

Como puede inducirse de dicho esquema, los parámetros fundamentales de procesamiento, 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 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 un 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.

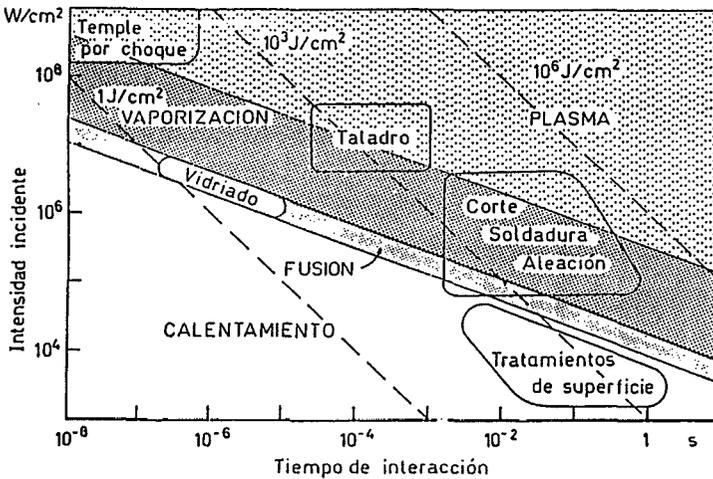


Figura 6. Diagrama de posibles tipos de interacción del láser con la materia en aplicaciones industriales de procesado en función de la densidad de potencia del haz incidente y el tiempo de interacción.

Como dato orientativo, un láser de una potencia intermedia (varios kilovatios) permite el corte de espesores de hasta 10-12 milímetros 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.

En la figura 8 se recoge una gráfica orientativa, caracterizadora de la velocidad típica de corte con láser de acero al carbono en función del espesor cortado de este material.

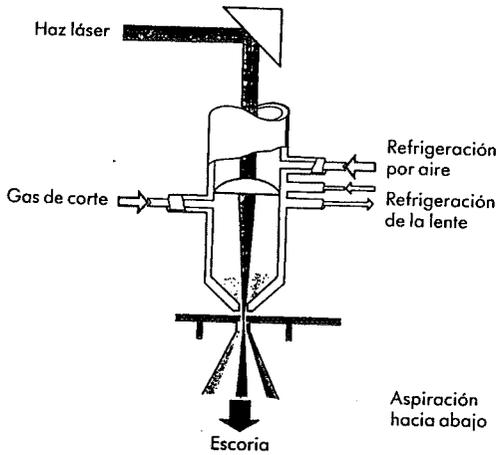


Figura 7. Esquema simplificado del cabezal de un dispositivo de corte con láser asistido por gas reactivo. Cortesía de TRUMPF.

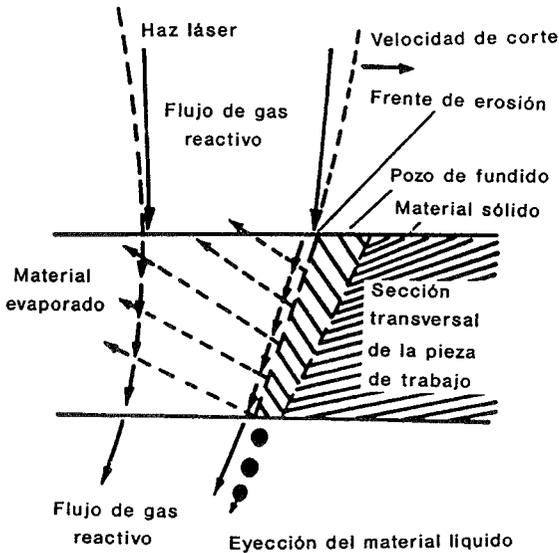


Figura 8. Representación esquemática del proceso de corte de materiales con láser asistido por gas reactivo.

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 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 principio, 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 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 éstas.

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. En la figura 9 se recoge una representación esquemática de dicho proceso.

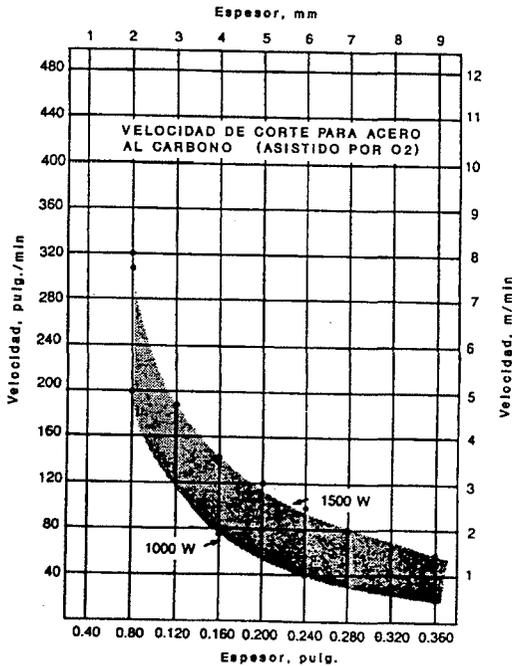


Figura 9. Diagrama de velocidades típicas de corte de acero al carbono con láser de CO₂ de flujo transversal asistido por oxígeno en función del espesor de material cortado. Fuente: Industrial Láser Annual Handbook, Belforte & Levitt, Eds., 1990.

De forma semejante al caso del corte, los parámetros definitivos 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 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, 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, según se advirtió en el punto correspondiente a descripción fenomenológica de la interacción láser materia a elevadas intensidades, 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, según lo descrito, bien potenciar al 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. Precisamente el estudio, caracterización y control de la dinámica del plasma asociado al proceso de soldadura de grandes espesores es uno de los temas fundamentales de investigación en el momento presente en este campo (el grupo de trabajo del autor viene trabajando en el mismo desde 1989, en colaboración con prestigiosos equipos de investigación, en el marco de proyectos cooperativos europeos), y su solución permitirá el desarrollo en toda su potencialidad de esta fundamental aplicación de los láseres de potencia.

En lo referido a requerimientos de la fuente láser empleada para la soldadura de materiales metálicos por penetración profunda (grandes espesores) se requieren densidades de potencia del orden o superiores a 10^6 W/cm^2 , las cuales sólo pueden ser suministradas por grandes láseres, con potencias del orden de varios kilovatios. A título orientativo a este respecto, en la figura 10 se recoge una gráfica de las velocidades de soldadura posibles para distintos espesores de acero al carbono en función de la potencia de haz láser empleada.

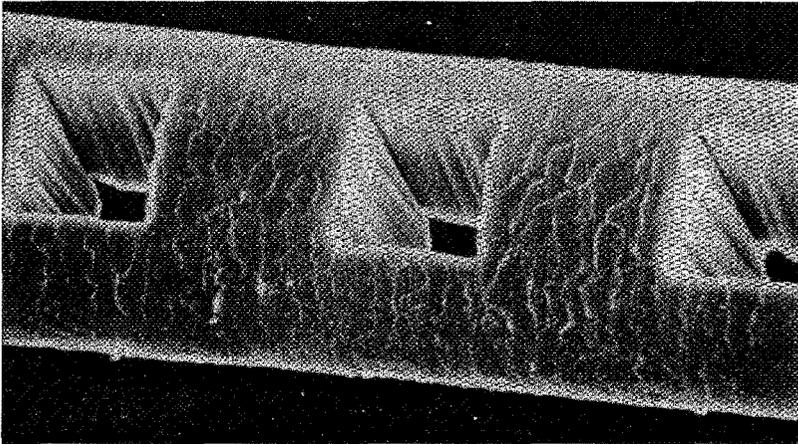


Figura 10. Visión macroscópica del aspecto de taladros realizados por láser de excímero (mediante un mecanismo de fotoablación) sobre un cabello humano. Los taladros tienen una dimensión lateral de $50 \mu\text{m}$, Cortesía de EXITECH Ltd.

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 procesos productivos industriales, con gran ventaja sobre las técnicas convencionales de unión. Resulta innecesario, a este respecto, citar la gran importancia que la soldadura por láser está llamada a tener en todo el mundo en el sector de la construcción naval.

e) Procesos industriales de tratamiento superficial de materiales con láser.

El fundamento de estos procesos 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, etcétera. Se trataría, en definitiva, de procesos similares a los convencionales de temple, recubrimiento superficial, aleación superficial, etcétera.

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 caso 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 material aleado. De esta forma, 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 coste 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.

Finalmente en este punto, una técnica que se presenta como una seria alternativa a los tradicionales procesos de endurecimiento superficial de materiales por onda de choque (perdigoneado y similares), de gran interés en la industria de bienes de equipo del sector energético, es el endurecimiento superficial de materiales por onda de choque generada por láser. Esta aplicación, sólo factible con la ayuda de láseres impulsionales de elevada potencia, aprovecha la conversión de energía del láser a energía termofluidodinámica del plasma generado sobre el material a elevadas intensidades para propiciar el desarrollo de una fortísima onda de detonación, capaz de modificar de forma eficiente la estructura cristalina del mismo. A pesar de encontrarse, como otras muchas aplicaciones del láser a elevada intensidad, en fase de investigación, esta técnica presenta un gran número de ventajas (sobre todo, versatilidad) sobre los procedimientos convencionales citados, y ha de constituir, sin duda, un elemento de referencia en el sector en un futuro no lejano.

IV. RECAPITULACIÓN: EL LÁSER Y EL FUTURO DE LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN.

Recapitulando, finalmente, sobre las ventajas que la utilización del láser ofrece sobre las herramientas tradicionales de fabricación, son de destacar, entre otros, los siguientes aspectos:

Desde el punto de vista de los procesos de fabricación en sí:

- a) Queda permitida una mayor velocidad y fiabilidad de procesado.
- b) Queda permitido el trabajo en condiciones similares sobre una amplia variedad de materiales.
- c) Puede ser eliminado o reducido sustancialmente el uso de troqueles y herramientas de ensamblaje.

- d) Queda permitida una reducción importante en los pesos y fortaleza de los elementos resistentes de las máquinas-herramienta.
- e) Resultan normalmente innecesarias operaciones subsidiarias tras la mayoría de los procesos.
- f) Quedan posibilitadas mejoras importantes en la precisión dimensional y el ajuste entre piezas mecanizadas, así como un mejor grado de repetibilidad en las operaciones.

Desde el punto de vista de la planificación y gestión de la fabricación:

- a) Queda fácilmente posibilitado el trabajo sobre una gran variedad de tamaños y formas.
- b) Queda permitida una mayor flexibilidad en la utilización de estaciones de trabajo, al ser permitidas, en forma conjunta, operaciones de taladrado, corte, micromecanizado, tratamientos superficiales, soldadura, etcétera.
- c) Queda realmente posibilitada la automatización de las operaciones, con gran precisión y fiabilidad.
- d) Queda asimismo posibilitada la interconexión de operaciones en secuencias complejas (incluida la posibilidad de intercambio de haz entre distintas estaciones para operaciones *just-in-time*).
- e) Queda permitido el trabajo en entornos remotos o inaccesibles mediante el uso de fibra óptica.

Desde el punto de vista de la gestión integral y competitividad de la producción:

- a) Quedan permitidos ahorros sustanciales en la utilización de materiales y en los costes de fabricación.
- b) Son obtenibles, en general, unas mayores calidades de fabricación.

- c) Queda posibilitada una optimización efectiva en la concepción de los procesos de fabricación.
- d) Queda posibilitada la realización de procesos esencialmente inabordables con tecnologías convencionales de fabricación.

Por todo ello, y teniendo en cuenta las aludidas cada vez más estrictas exigencias en cuanto a calidad y competitividad desde el punto de vista económico a que las modernas tecnologías de fabricación habrán de hacer frente en el futuro, se puede concluir en la gran importancia que, a partir del momento presente, ha de revestir el láser como elemento clave para el desarrollo de un cada vez más importante número de tareas productivas.

Ello obliga, en fin, a considerar la tecnología láser como una verdadera tecnología de futuro en el mundo de las tecnologías de fabricación.

V. BIBLIOGRAFÍA BÁSICA SOBRE LÁSERES Y SUS APLICACIONES

- (1) ALBRIGHT, C.: *Laser Welding, Machining and Materials Processing*. Springer (1985).
- (2) DULEY, W.W.: *CO₂ Lasers: Effects and Applications*. Academic Press (1976).
- (3) DULEY, W.W.: *Laser Processing and Analysis of Materials*. Plenum Press (1983).
- (4) ELOY, J.F.: *Power Lasers*. Ellis Horwood Ltd (1987).
- (5) KOEBNER, H.: *Industrial Applications of Lasers*. John Wiley and Sons (1978).
- (6) ORZA, J.M., DE: *Láseres*. Publicaciones C.S.I.C. (1986).

- (7) READY, J.F.: *Effects of High Power Laser Radiation*. Academic Press (1971).
- (8) READY, J.F.: *Industrial Applications of Lasers*. Academic Press (1978).
- (9) VON ALLMEN, M.: *Laser Beam Interaction with Materials*. Springer (1987).
- (10) WEBER, M.J., DE: *Handbook of Laser and Technology*. CRC Press (1986).