

40
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

OPTIMIZACION DE MARCADO CON LASER
CON EL SISTEMA EMCO-LS-140, PARA EL
ACERO INOXIDABLE 304 Y ACRILICO.

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

ROBERTO CISNEROS HERNANDEZ

ASESOR: ING. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN



CD. UNIVERSITARIA

ABRIL DE 1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis Padres:

**Berta Hernández Morales.
Eduardo Cisneros Castro.**

Por estar siempre a mi lado y creer en mi, además de su apoyo incondicional, sin más que mi trabajo para agradecerles mil gracias.

A mis queridos Abuelos:

**Ma. Luisa Morales.
Nazario Hernández.**

Aunque algunos de ustedes no estén presentes físicamente, pero yo estoy seguro de que su espíritu estuvo siempre conmigo apoyándome y orientándome.

A mis queridos y amados hermanos:

**Virginia, Ma. Luisa, Ma. del Carmen, Miguel, Arturo,
Eduardo.**

Quien no conoce nada, no ama nada. Quien no puede hacer nada, no comprende nada. Quien nada comprende, nada vale. Pero quien comprende también ama, observa, ve...Cuanto mayor es el conocimiento inherente a las cosas y personas, más grande es el amor que puede sentir. Que es el amor que yo siento por ustedes. Aunque

A mis queridos Familiares:

**Gracias a mis tíos y tías. (Especialmente Concepción,
Magdalena y la Sra. Leonor Sánchez).**

Cuando dios agita su corazón, también tiene amor para ti.

A mis queridos Sobrinos:

El sabio dice: cielo es hombre, y tierra mujer. Cuando la tierra no tiene calor , el cielo se lo manda. Cuando pierde su frescor y su rocío, el cielo se lo devuelve.

y a mi querida Facultad de Ingeniería.

AGRADECIMIENTOS:

A los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica por las facilidades otorgadas, y en especial al Ing. Magdalena Trujillo Barragán, M.I Armando Ortiz Prado, Ing. Sara Cerrud y Ing. Emiliano Anguiano Rojas, por su apoyo y sus valiosos conocimientos, además de sus consejos y enseñanzas.

Y a todos mis compañeros del seminario y de toda la carrera:

***Alejandro.
Carmen
Cesar Flores
Beatriz
Eric
Francisco
German
Guillermo
Miguel Angel
Neto
Raúl
Vicente***

por su amistad, comprensión y apoyo desinteresado.

El egoísmo y el amor a sí mismo, lejos de ser idénticos son realmente opuestos, ya que la persona egoísta sólo se interesa por sí misma, no siente placer en dar, por eso " yo" los considero lo opuesto.

INDICE

PROLOGO.

CAPITULO I INTRODUCCIÓN.

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
-----------------------	---

CAPITULO II. ANTECEDENTES.

2.1 APLICACIONES DEL MARCADO.....	5
2.2 MÉTODOS DE MARCADO E IDENTIFICACIÓN.....	6
2.2.1 Marcado hecho a pulso.....	6
2.2.2 Impresión.....	7
2.2.3 Estarcido.....	8
2.2.4 Grabado y ataque químico.....	8
2.2.5 Inscripción.....	9
2.2.6 Estampado.....	9
2.2.7 Placas, rótulos y etiquetas.....	9
2.2.8 Calcomanías.....	10
2.2.9 Grabado en relieve y acuñado.....	11
2.2.10 Las tablas de las características de los métodos de marcado.....	14
2.3 PROCESOS DE GRABADO.....	14
2.3.1 Maquinado con chorro abrasivo (MCA).....	14
2.3.2 Maquinado ultrasónico (MUS).....	16
2.3.3 Maquinado electroquímico (MEQ).....	18
2.3.4 Esmerillado electroquímico (EEQ).....	21
2.3.5 Maquinado o fresado químico(FEQ).....	24
2.3.6 Proceso de remoción de materiales por electrodescarga (MED).....	26
2.3.7 Remoción de material con haz de electrones(MHE).....	29
2.3.8 Remoción de material con rayo láser(MHL).....	30
Tablas de las características de los procesos de remoción de material.....	35

CAPITULO III. MARCADO CON LÁSER.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO LÁSER.....	36
3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA LÁSER.....	42
3.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN LÁSER DE ALTA POTENCIA CON LOS MATERIALES.....	43
3.3.1 Características que deben presentar los materiales.....	45
3.4 TIPOS DE LÁSERS PARA EL MARCADO.....	48
3.5 MÉTODOS DE MARCADO LÁSER.....	51
3.5.1 Marcado con imagen de máscara.....	51
3.5.2 Proceso de barrido o scanner.....	54
3.5.3 Marcado con matriz de puntos.....	55
3.5.4 Grabado láser.....	56
3.6 CARACTERÍSTICAS DEL MARCADO CON LÁSER.....	57
3.6.1 Tamaño de letras producidas por el láser.....	57
3.6.2 Ancho de líneas.....	58
3.6.3 Profundidad de la escritura.....	58

3.7 APLICACIONES DEL MARCADO LÁSER.....	59
3.8 VENTAJAS DEL MARCADO CON LÁSER.....	61

CAPITULO IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

4.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	62
4.2 PARÁMETROS DE EXPERIMENTACIÓN.....	66

CAPITULO V. RESULTADOS.

RESULTADOS.....	70
CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES.....	77

APÉNDICE A
APÉNDICE B
BIBLIOGRAFIA

PRÓLOGO

Esta investigación se enfoca en realizar los procesos de manufactura con láser de una forma más económica y con la mayor calidad posible, basándonos en un estudio sistemático de los parámetros que intervienen en estos procesos, como son la posición focal, la velocidad del proceso, potencia del haz, el tipo de gas de proceso, etc. Por otra parte, con estos estudios se pretende alcanzar un conocimiento más profundo de la influencia que estos parámetros tienen sobre algún caso en específico, como en el caso del marcado con láser en máquinas de media potencia, y con ello sugerir métodos de procesamiento eficaces, rápidos y económicos, con el fin de que su aplicación a nivel industrial sea más confiable y accesible. Por lo que el estudio siguiente, se realizó para materiales con las características adecuadas para el proceso de marcado con láser aplicados en la industria.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La manufactura significa hacer artículos y objetos mediante procesos industriales. La derivación de la palabra manufactura significa hacer a mano, sin embargo, actualmente se efectúa mediante maquinaria, es innegable que el adelanto y bienestar de una sociedad está íntimamente ligada al desarrollo y productividad de los procesos de fabricación que se emplean, podemos mencionar una infinidad de procesos, pero en nuestro estudio sólo mencionaremos a los no convencionales, ya que estos tienen que ver con el proceso de manufactura en investigación; es decir, el marcado con láser.

Fue en 1958 cuando C.H Townes y A. L Shalow propusieron que los principios en que se basa la amplificación de microondas por emisión estimulada, producía el maser. Formulando la posibilidad teórica del fenómeno realizaron las primeras experiencias con gas amoníaco; sin embargo el cuerpo más empleado fue el de rubí sintético de muy elevada pureza de iones cromo Cr^{+3} , en alúmina (Al_2O_3). Pocos años más tarde, T.H. Maiman desarrolló el primer láser operante, que estaba formado por una barra de rubí con extremos reflejantes, y rodeado de una lámpara helicoidal de destellos. Poco después se desarrolló un láser de gas Helio Neón (He, Ne).

El desarrollo del primer láser de dióxido de carbono (CO_2), se le acredita a C.K.N. Patel, quien realizó su trabajo en los laboratorios Bell. Dos años más tarde, en 1960, creó Teodoro Maiman el primer láser o sea un Maser excitado por luz, utilizando un cristal de rubí en forma cilíndrica de unos 300 mm de longitud por 10 mm de diámetro. Este rubí se excita con una fuente de potencia muy elevada de luz ordinaria estimulando la emisión con un fogonazo intenso de flash que producía la liberación de energía almacenada en forma de un haz de luz roja, así, el láser pudo manipularse de tal manera que se producen diversos procesos de manufactura que van desde el corte de cualquier material (incluyendo a los plásticos) hasta el marcado de los mismos. Hoy en día el marcado con láser tiene una extensa aplicación en cualquier proceso de manufactura donde el proceso es controlado por computadora extremadamente flexible.

El primer láser de CO_2 para uso industrial se fabricó en 1966, y se le llamó Coherent Modelo 42, de 50 Watts de potencia de salida. Este modelo todavía se emplea para cortar, perforar, y sellar plásticos. En 1971 se construyó el láser modelo 43 para satisfacer las necesidades de la industria del tratamiento de los metales y de otras que requieran un láser para elevadas capacidades de producción. Este diseño avanzado emitía un haz con una elevada potencia nominal de salida de 500 Watts. La consideración principal en su diseño fue la estabilidad mecánica de sus elementos ópticos. El modelo 43 aún se usaba para grabar hule y otras aplicaciones menos críticas.

De la experiencia que se obtuvo con este primer diseño, se han desarrollado y construido una nueva generación mejorada de equipos de CO₂ industriales, denominada serie Everlast^{MR}.

El marcado con láser comenzó en los años sesenta, con el desarrollo del procesamiento de materiales, como una de las distintas posibilidades de aquella nueva tecnología. Desde entonces los láseres han evolucionado, encontrando un uso extensivo en numerosas aplicaciones industriales. Estos sistemas de marcado también se han ido desarrollando durante estos últimos años, creciendo en importancia hasta configurar un sector independiente de la industria. En un tiempo futuro, su campo de aplicación presentará una gran área de consumo. Aunque en este momento la necesidad del consumidor acerca del láser está surgiendo sólo para emergencias, incluyendo sistemas de seguridad caseros, lectura de imágenes holográficas sobre tarjetas de crédito, y lectura de códigos ópticos impresos en productos al consumidor, se están desarrollando técnicas más avanzadas cuyas principales aplicaciones son las de corte de materiales, tratamientos térmicos, lectura de código de barras, marcado, soldadura, y máquinas de haz de láser.

Hoy en día compete económicamente con otras muchas tecnologías alternativas de marcado, y en ocasiones, como el único sistema de marcado utilizable en aplicaciones complicadas. De este modo está aumentando considerablemente su incorporación a la industria. Apesar de que su precio de venta es más elevado que el de los métodos tradicionales por tinta, el bajo costo que representa su mantenimiento y el de sus consumibles que utiliza hace rentable su inversión en un corto plazo de tiempo. La definición de marcado por láser cae en algún lugar de la imprenta y el procesamiento de materiales.

A pesar de que estos sistemas láser pueden emplearse para generar líneas de textos sobre papel u otro tipo de sustrato imprimible, no pueden competir con la alta velocidad que adquieren otros sistemas más sofisticados como, las impresoras láser. Los sistemas de marcado láser permiten marcar mensajes de corta o media longitud o imágenes directamente en productos ya terminados. Estas marcas son típicamente permanentes, aplicadas sin contacto directo con la pieza, sin emplear herramientas, no requieren ningún tipo de proceso posterior de fijado y no introducen ningún material adicional. Cualquiera de estas características, además de la alta velocidad y flexibilidad, pueden ser suficientes como para seleccionar este sistema frente a otros. Las técnicas clásicas de marcado o grabado industrial son pintura o por estampación por calor. Como todas las aplicaciones industriales la elección del método vendrá condicionada por las prestaciones y resultados deseados en el producto acabado.

De esta manera, el láser ofrece una solución alternativa, competitiva con las técnicas actuales. Sus principales características son las de realizar el marcado a alta velocidad, con caracteres imborrables y de alta calidad, obteniéndose marcas muy claras aún en tamaños realmente pequeños. El costo de mantenimiento es barato y no necesita de aporte de material, lo que lleva a la reducción del precio global de la marca. A pesar de que ofrece gran versatilidad dentro de la gama de materiales, no todos pueden ser tratados por el mismo equipo láser, constituyendo una limitación en el caso de una industria que opere con materiales muy distintos debido al elevado costo del equipo. En comparación de los diversos procesos de marcado con el sistema láser, por ejemplo, el marcado por tinta es mucho más barato en cuanto equipo, pero requiere empleo de tintas de precios muy elevados y muchas veces borrrables. Además, la velocidad de trabajo se ve claramente disminuida y las marcas son de inferior calidad. Un inconveniente adicional es que las superficies a tratar deben estar completamente limpias.

El proceso de marcado con láser es controlado por computadora lo que hace al sistema más rápido y flexible. La entrada al controlador de la computadora del sistema láser puede ser a través de cualquier entrada del dispositivo de la computadora, semejante puede ser para las terminales, cintas, o discos flexibles. El usuario del software debe preparar a los sistemas de marcado con láser, de tal manera que el operador no necesite de un programador de computadoras para poder realizar la corrida del procesos en la máquina.

Las máquinas de marcado con láser pueden presentar un controlador que maneje un conjunto de coordenadas combinadas por un motor escalonado suministrando las posiciones programadas por el sistema. Para la aplicación de la producción de una interface computadora y equipo a operar, los microprocesadores nos permiten un índice determinado de velocidad, aceleración y posición de los parámetros. Con la ayuda de controles (tableros de control digital), por medio de microprocesadores se logra una colocación rápida y precisa de la pieza que se va a trabajar. El microprocesador puede también encender o apagar el láser en la posición en que esté el tablero, o configurar la potencia para lograr diversos efectos; se pueden obtener movimientos de direcciones adicionales, mediante el control de CNC, para hacer girar la pieza, variar la distancia total del lente; controlar las lentes giratorias, u operar el chorro coaxial de gas.

Debido al gran número de ventajas que presenta este proceso, ya mencionadas anteriormente, y aún más si éste posee un controlador numérico por computadora -CNC- como en el caso del sistema EMCOLS140 con que se cuenta en laboratorio de manufactura avanzada; será el objetivo de esta tesis que surge con la necesidad de optimizar el aprovechamiento del sistema láser con el que se cuenta. Aunque este proceso de marcado o grabado no sea costeable con el equipo a utilizar, se pueden plantear los siguientes objetivos de acuerdo a dichas necesidades:

- Mediante la investigación teórica, obtener la información necesaria de los procesos de marcado o grabado existentes y funcionales, como sus ventajas y desventajas que presentan estos.
- Obtener los parámetros necesarios de marcado o grabado, para los materiales más utilizados.
- Realizar pruebas de marcado, de acuerdo con la investigación teórica, en diferentes materiales de uso de la Ingeniería.
- Mediante los resultados obtenidos, proporcionar una relación de los parámetros de marcado de láser con respecto al material usado.

CAPÍTULO II

II ANTECEDENTES

2.1 APLICACIONES DEL MARCADO

El proceso de marcado principalmente sirve para la identificación de productos, partes, y materiales, en los que se pueden incluir los siguientes:

1. Para la identificación del producto: Nombre de la marca, nombre del modelo y número, como segundo se pueden incluir datos sobre el acabado del producto.
2. Para publicidad: Marca registrada, el nombre de la manufacturera y modelo de identificación, atractivo de la misma publicidad.
3. Grado indicado, talla, o clase de material o componentes.
4. La indicación de una inspección u otra operación de manufactura.
5. La indicación del número de partes en caso de reparación del producto que se pueda requerir posteriormente.
6. Para protección de patentes.
7. La indicación de datos de manufactura o número de serie del producto.
8. Para decoración.
9. La indicación de dimensiones de componentes antes de su selección.
10. Resaltar a otra marca funcional.
11. Etiquetar instrucciones sobre la operación del producto.
12. Exhibición de especificaciones del producto tales como potencia (Hp), voltaje (V), etc.

2.2 MÉTODOS DE MARCADO E IDENTIFICACIÓN

La definición del marcado cae en algún lugar entre la imprenta y el procesado de materiales. Las técnicas de marcaje o grabado industrial convencional son por pintura o de estampación por calor, donde el diseñador decide el rango de profundidad y ancho del marcado, como también los métodos a utilizar según sus características y preferencias, como pueden ser los siguientes:

2.2.1 *Marcado hecho a pulso*

Este método es fundamentalmente el marcado visible de superficies, con el uso, de cepillos, crayón, marcado con tiza, pluma, lápiz, etc. Todo el dispositivo de marcado es propulsado a mano. El marcado es una acción que siempre comprende la transferencia de partes del medio de marcado (entintar, tefir, tizar lápiz de grafito, etc.) todo para el marcado de superficies.

2.2.2 *Impresión*

Procedimiento de la técnica de imprimir por medio de huellas directamente sobre la pieza de trabajo, como pueden ser lettereros, rótulos o etiquetas. La litografía es frecuentemente utilizada para el proceso de impresión de etiquetas y lettereros, como una impresión convencional de letra planchada (tipo relieve). El marcado por estampado con rodillos es un método que se usa para la impresión cuando las superficies no son completamente planas. La litografía es el procedimiento por el cual se pueden reproducir escritos, dibujos y grabados. Esta técnica se basa en la repulsión recíproca entre sustancias lipófilas e hidrófilas (donde el agua rechaza por las tintas grasas); las zonas que se imprimen y las que no se imprimen se encuentran al mismo nivel, por ello las matrices litográficas se llaman también planográficas. Estas se pueden grabar o dibujar en piedra una imagen o escrito para después reproducirlo. La piedra que se utiliza es una caliza de grano muy fino, la cual se pule la superficie y se dibuja en ella (al revés) con lápiz litográfico o con una tinta grasa que penetra en el grano y forma un jabón calcáreo (calca) insoluble. La tinta sólo se adhiere a los trozos de sustancia grasa, y las partes donde no hay trozos quedan limpias, pero es preciso mantener la piedra húmeda para imprimir, esto se hace en una prensa especial. Donde se pueden obtener hasta 100 pruebas buenas de una piedra. Para la obtención de la impresión de la imagen o escrito. El rodillo de impresión, es un rodillo de acero cubierto de goma, la cual lleva la película plástica a imprimir y la pone en contacto con el cilindro de impresión. Se aplica un nivel de presión para asegurar un contacto completo, la zona de contacto debe tener una distancia de cercas de 1 cm para que se escoja adecuadamente el recubrimiento.

En el proceso de grabado directo, la tinta se transfiere del rodillo directamente a la superficie. La tinta esta circulando continuamente por el efecto de una bomba, y el rodillo de impresión se entinta inmediatamente después de cada impresión.

2.2.3 Estarcido

Es un sistema de calcado por medio de tintas, pinturas u otros fluidos colorantes que son aplicados sobre la superficie de la pieza de trabajo, creando así una marca. Los fluidos colorantes pueden ser aplicados con cepillo, rociador, rodillo, etc., donde el estarcido puede ser aplicado sobre una superficie de papel, acero, cobre, goma, plástico, etc., logrando así que el dibujo o figura quede calcado sobre la superficie. Este proceso necesita de una plantilla que va ser pintada con un aerosol, las plantillas o máscaras son generalmente de níquel electroformado, y algunas veces de papel, hule, plástico, que se utilizan para rutinas cortas de producción. Hay tres tipos de plantillas o máscaras, las máscaras de contacto que se utilizan para llenar y mantener las secciones que no se marcaran limpias, mientras que varias áreas en el interior se están pintando. Estos contactos están suspendidos con alambres, y deben llenar las secciones con depresiones para prevenir el derramamiento de pintura. Las máscaras de contacto también son utilizadas para proteger áreas que se trabajan en vacío. Las máscaras de bloque o corte se utilizan para colocar la pintura en áreas elegidas que no necesiten ningún proceso de pintado. Este tipo de máscaras se utilizan cuando las líneas y las letras son muy pequeñas para ser máscaras individuales. La máscara de labio cubre áreas más profundas con líneas que sean más definidas sin la utilización de procesos secundarios de limpieza.

La serigrafía impresa es otro método particular del estarcido usado cuando se requiere efectos decorativos o atractivos de marca o nombre del modelo para un acabado final del marcado. La serigrafía es un procedimiento de impresión en el que se filtra tinta a través de una pantalla de seda o nylon que esta tensada sobre un bastidor, previamente, las zonas de la seda que no deban imprimir quedan cubiertas con una película que no deja pasar la tinta, y de este modo, sólo entintará la parte correspondiente al dibujo que se quiere reproducir. Este proceso se emplea para la impresión de carteles publicitarios, así también para reproducciones en tela, cuero, vidrio, etc., siendo de mucha utilidad para dimensiones más bien grandes. Usando sistemas manuales, como todavía se hace frecuentemente, la producción no supera los cincuenta ejemplares por hora. Existen máquinas automáticas o semiautomáticas con las que se alcanza una producción de 700 a 800 ejemplares por hora. En estas la distribución de tinta se efectúa mediante una raqueta de goma flexible cuyo recorrido de trabajo es el de ida, mientras que el de retorno es un vacío, permaneciendo separada de la pantalla.

2.2.4 Grabado y ataque químico

Estos dos métodos de marcado producen marcas sobre las superficies de metal o de otros materiales por medio de la eliminación de partes del material de tal manera que el material restante forma el marcado deseado. En el grabado la estampa queda impresa con una plancha grabada, la finalidad del grabado es la de adornar superficies. Hay tres tipos de sistemas de grabado básicos. El de relieve, en que las partes que se van a imprimir quedan en relieve y sobre ellas va la tinta. Las de hueco grabado, o al buril, en que la tinta queda en los surcos y de ahí la toma de papel (generalmente húmedo), mientras que las superficies en relieve se limpian para que se impriman. Las litográficas en las cuales se dibuja directamente en la superficie de piedra con tinta o con un lápiz de materia grasa, y se somete a un tratamiento para que la tinta se adhiera a los trazos. Existen muchos procedimientos técnicos de grabado, pero de los más importantes son: Al agua fuerte en donde se cubre la plancha con una capa de barniz, en la que se dibuja sobre ésta, y los surcos se obtienen mordiendo luego la plancha con un ácido. Al agua tinta (o a media tinta) es aquel donde se obtienen matices haciendo que el mordiente (elemento químico abrasivo) produzca un grano de plancha, para lo cual ésta se cubre con un polvo de resina que se adhiere. Al lavado es aquel en el que sobre la plancha grabada se pinta con un pincel y con un mordiente líquido en vez de tinta, para obtener efectos como el lavado con tinta china sobre papel. A punta seca es aquel que no usa mordiente, la plancha se raya con un buril de acero. En un ataque químico el material es removido por un agente químico u otra acción electrolítica, la resultante es una marca que puede ser positiva o negativa, donde el material removido será la marca negativa y el material restante que formará la imagen es la marca positiva.

Para el grabado el ancho de pie de letra debe ser mínimo de 3 veces el material marcado, esto es para tener un límite de marcado en un material. El ángulo de bisel para el marcado de letras deberá normalizarse entre 35 y 40 grados. Para letreros finos y claros, el ángulo puede estar dentro de 20 a 30 grados, el ángulo más pequeño provee flujo de material y larga vida para el dado usado.

2.2.5 Inscripción

La aplicación de un símbolo por el uso de un dispositivo de marcado caliente, el cual desgasta la marca en la superficie es conocido como inscripción.

Esta es una de las más antiguas clases de marcado, ya que esta goza de un amplio uso para identificar materiales tales como: madera, piel, fibra, plástico, materiales compuestos, etc. El estampado en caliente transfiere una imagen por medio de calor quedando impresa en la pieza de trabajo.

2.2.6 Estampado

Es un método de marcado para realizar letras y otros símbolos que son impresos dentro la superficie de la pieza de trabajo, esto se realiza por medio de un dado endurecido, el cual aplica un estado de fuerzas a la pieza de trabajo para dar forma al estampado. Estas fuerzas pueden ser aplicada por un martillo de bola, una presión neumática, hidráulica o mecánica las cuales pueden estampar de un solo golpe. La estampación mecánica en caliente consiste en someter aún metal, por medio de una prensa o martillo a esfuerzo de compresión, entre los moldes de acero denominados estampas. Estas generalmente compuestas, por dos piezas, denominadas martillo o estampa superior y yunque o estampa inferior. La estampa superior se fija en la corredera de la prensa, y la estampa inferior en la mesa. Cada una de las dos piezas componen la estampa que está formada por un bloque de acero rectangular o cilíndrico, según la forma de la pieza que se desea estampar.

En la estampación en frío, una parte queda fija sobre la mesa de la prensa y se denomina matriz, la otra parte va unida a la maza o carro y se denomina punzón, aunque la operación que realice no sea la de punzonado. La estampación se realiza colocando la chapa sobre la matriz y presionando sobre ella el punzón de la forma adecuada.

2.2.7 Placas, rótulos y etiquetas

Estos son comúnmente usados para proveer algún tipo de información que serían identificadas en el producto. La placa es una lamina o película formada o superpuesta en un objeto. Como sabemos, un rótulo es un título que encabeza un escrito o parte del mismo; es decir, cualquier inscripción que indique el contenido, como puede ser un cartel público o de carácter comercial, que señala el nombre de una tienda o su dedicación de un fabricante de un producto manufacturado. Las etiquetas es un letrero que se pega o se sujeta a algo para especificar su contenido. Todos los métodos de marcado mencionados anteriormente son también aplicables a las placas, rótulos y etiquetas.

2.2.8 Calcomanías

Es la transferencia del material impreso de película plástica sobre una superficie de papel, logrando así una mejor presentación del nombre de las marcas, marca registrada, y la atracción decorativa del material.

2.2.9 Grabado en relieve y acufado

En el grabado sobre una superficie en relieve, las fuerzas opuestas a dichas superficies son equivalentes a un punzonado en donde el material será prensado entre dos dados macho y hembra, las cuales darán forma a la pieza de trabajo.

En el acufado, ambos efectos son producidos en una sola superficie que se ve afectada necesariamente por un troquel que imprime sobre la superficie una figura o símbolo que quedará marcada sobre la pieza de trabajo. Por lo que en este proceso la pieza de trabajo es marcada al ser prensada o comprimida con los dados que conllevan a una fuerza necesaria. Este metal u otro material debe fluir dentro de la cavidad de los dados para darle forma a la pieza de trabajo. En la lámina metálica donde el espesor es tan pequeño, en su área de trabajo prácticamente no hay alivio para la presión de exceso. Aquí se requieren diseños nítidos, como de paneles estampados.

2.2.10 Las tablas de las características de los métodos de marcado

A continuación se muestran las tablas 2.1, 2.2, y 2.3 donde se mencionan las características, aplicaciones, y costo de los equipos para marcar. Estas tablas nos proporcionan datos que nos dan a conocer la evaluación de cada uno de los métodos de marcado.

Método de mercado	Costo relativo de la herramienta	Costo relativo del equipo. Métodos de mercado	Costo unitario relativamente directo	Remarcado; cantidades de producción.
Hecho a pulso	Ninguno	Ninguno	Alto	Adecuado para cantidades bajas, aplicación con límite de información.
Impreso	Moderado	Elevado	Bajo	Para alto y medio nivel de producción.
Estampado con rodillo	Bajo	Ninguno	Moderadamente bajo	Para bajas cantidades de producción.
Estarcido	Bajo	Ninguno	Moderado	Para bajas cantidades de producción.
Serigrafía	Moderadamente bajo	Ninguno	Moderado	Para alta producción de mecanizado.
Ataque químico	Moderadamente bajo	Bajo	Moderado	Para bajas y medias cantidades de producción.
Grabado	Bajo	Moderadamente elevado	Elevado	Para bajas cantidades excepto donde la apariencia de grabado es esencial.
Marcado	Moderado	Bajo	Moderado	Para altas y medias producciones.
Estampado en caliente	Moderado	Moderadamente alto	Moderado	Para altas y medias producciones.
Acufado en moneda	Elevado	Elevado	Bajo	Para altas cantidades únicamente.
Estampado ensamblado	Moderado	Bajo a elevado		Estampado a mano para bajas producciones y para estampado a presión moderado para altas producciones.
Letreros	Moderado		Elevado	Estampado moderado y producción alta.
Rotulados	Moderado		Bajo a moderado	Uso de niveles de producción para productos.

Tabla. 2.2 Factores económicos para varios métodos de mercado

Método de marcado	Minima altura de letra recomendada, mm (in)	Permanente (P) o fácilmente removible (R)	Remarcado	Aplicaciones típicas
Hecho a pulso	2.5 (0.100)	R	Apariencia y legibilidad pobre ; limitada	Grado de materia prima (código de color), etiquetas de identificación
Impreso	1.5 (0.060)	R	Factibilidad de multicolores	Grado de materia prima, identificación de letreros , etiquetas, de rótulos
Estarcido	6 (0.25)	R	Buena talla de rotulado	Transporte de cartón, inyección de abrasivos, vidrio y componentes cerámicos.
Serigrafía	1.5 (0.060)	R	Buena apariencia para detalles y decoración	Signos, paneles de instrumentos, carátulas de reloj
Ataque químico	1.5 (0.060)	P	Profundidad normal de grabado, 0.07-0.3 mm (0.003-0.012 in); posibilidad de un trabajo mas fino por métodos fotográficos	Instrumentos de graduación
Grabado	2.5 (0.100)	P		Placas y letreros
Inscripción	1.5 (0.060)	P		Herramientas con mango de madera
Estampado en caliente	1.5 (0.060)	P	Decorativo metálico y otros colores	Pelotas de golf, recipientes de cosméticos, y otras más aplicaciones

* 1.5 mm recomendados para legibilidad; es posible letra mucho más pequeña.

Tabla 2.1 Aplicaciones y características de varios métodos de marcado

Método de marcado	Material de revestimiento	Materiales de base
Hecho a mano	Tinta, pintura, lápiz, crayón, tiza	Algunas superficies limpias serán adecuadas para el marcado pero es necesario tener superficies no resbalosas ni pulidas.
Impresión	Tintas de varios tipos	Papel, cartulina, madera, cartón, materiales metálicos, caucho.
Estampado por goma	Tinta	papel, madera, metales, tela, plásticos
Estarcido	Tinta, pintura, tefido	Papel, madera, metal, superficies pintadas, tela, plásticos.
Serigrafía	Tinta, pintura	Superficies pintadas, metal, vidrio, madera, plásticos, papel, tela.
Grabado	Ninguno	Vidrio, cerámicos y todos los metales.
Estampado	Ninguno	Todos los metales maquinables.
Marcado	Ninguno	Madera, tela, plásticos, cartón, piel.
Estampado en caliente	Una lamina especial pigmentada que trabaja con un película plástica.	Plástico, papel, cartón, piel, madera, goma.
Grabado en relieve	Ninguno	Hoja de acero, aluminio, latón, y otros metales formables.
Acuñado	Ninguno	Acero de bajo carbono, aluminio, latón, y otros metales formables.
Estampado idéntico	Ninguno	Acero, latón, aluminio, fierro colado, y acero para herramientas.
Calcado	Pinturas especiales, tintas, y dedos con una película plástica.	Cualquier material de superficie lisa.
Etiquetado	Varios materiales	Papel, plástico, cartulina, hojas metálicas.
Rotulado	Lo mismo que etiquetado	Papel, lamina plástica.
Letreros	Lo mismo que etiquetado	Varias laminas metálicas, plásticos.

Tabla 2.3 Materiales adecuados para varios métodos de marcado

2.3 PROCESOS DE GRABADO

Los procesos de grabado son otra manera de identificación de materiales, productos, etc. En donde se tiene una acción de arranque de material de la pieza a ser grabada. Entre estos procesos se encuentran los que a continuación se mencionarán.

2.3.1 Maquinado con chorro abrasivo (MCA)

Este proceso se lleva a cabo por medio de una acción erosiva o abrasiva. Los granos de abrasivo de tamaño, forma y tipo predeterminados, se impulsan con una corriente de aire comprimido de alta velocidad a través de una boquilla contra la superficie de trabajo. Cuando el abrasivo hace contacto con la pieza, producen el desprendimiento y arrastre de partículas de la pieza de trabajo. Cuando se remueve el material, no se producen virutas sino partículas de polvo a las cuales arrastra el aire comprimido. Los abrasivos más utilizados son el óxido de aluminio y el carburo de silicio; también se usan otros abrasivos para limpieza y pulimento, como la dolomita y el carbonato de sodio. El tamaño de los granos del abrasivo varía entre 15 y 40 μm , que se considera como polvo. El volumen de circulación de abrasivo está relacionado con la presión del aire y la rapidez de remoción del material. La velocidad de corte del abrasivo puede variar con el ajuste de la distancia desde la punta de la boquilla, volumen de abrasivo y presión de aire.

La distancia desde la punta de la boquilla hasta la pieza de trabajo influye en la rapidez de remoción del material y el diámetro de corte. El chorro de abrasivo, al salir de la boquilla y hasta 1.52 mm (0.060 in) de la punta, es cilíndrico, pero después se abre en abanico si la distancia es más grande. El material de la boquilla es de carburo de tungsteno o zafiro. (En la fig. 2.1 se ve una representación esquemática de este tipo de maquinado).

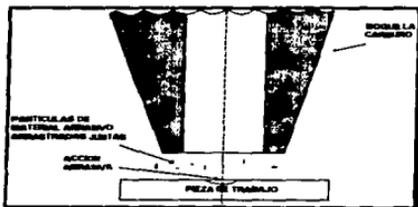


Fig. 2.1 Esquema del proceso de maquinado con chorro abrasivo.

Aplicaciones.-

Entre sus aplicaciones encontramos el tallado , esmerilado, grabado, pulimento y limpieza de materiales metálicos y no metálicos.

Las limitaciones básicas del proceso son:

1) poca cantidad de remoción de material, que sólo justifica el proceso para materiales difíciles o imposibles de trabajar por otros métodos.

2) el enclavamiento de los granos del abrasivo en el material, lo cual requiere limpieza cuidadosa al final del trabajo.

3) corte de gran conicidad de material grueso o en agujeros profundos.

Con el maquinado con chorro abrasivo se pueden obtener productos como dispositivos dentales, elementos de joyería y filtros de laminado óptico, etc.

El calor generado durante el maquinado es muy pequeño por lo que este no dañará a la pieza de trabajo. Este proceso cuenta con mayores ventajas, en la aplicación de maquinado de componentes sensibles al calor.

Cantidad de producción y costo. -

El equipo manual del maquinado-abrasivo y las herramientas son de bajo costo. El proceso de marcado es económico para pequeñas cantidades de producción, ya que el proceso es muy lento, o sea que se mueven 0.016 cm^3 (0.001 in^3) de material por minuto.

Materiales adecuados para la aplicación del proceso.-

El maquinado de chorro abrasivo es utilizado en materiales frágiles y sensibles al calor. Porcelana, cerámicos, vidrio, zafiro, cuarzo, tungsteno, aleación de cobre-níquel, metales endurecidos y semiconductores tales como, germanio, silicio y galio son los adecuados para ser procesado por el chorro abrasivo.

Tolerancias. -

Las tolerancias normales, para las dimensiones de maquinado de áreas es de $\pm 0.13 \text{ mm}$ (0.005 in), aunque es posible llegar a dimensiones menores de $\pm 0.05 \text{ mm}$ (0.002 in). Las tolerancias deseables de las superficies terminadas deben ser de $1.3 \mu\text{m}$ ($50 \mu\text{in}$). El ancho mínimo de ranura maquinable con (MCA) es de 0.13 mm (0.005 in) esta puede incrementar si el espacio entre la pieza de trabajo y la boquilla es mayor (como se muestra en la fig. 2.2).

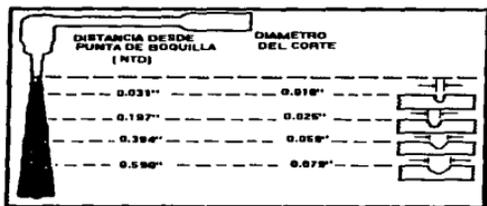


Fig. 2.2 Esquema de las distancias adecuadas para la boquilla y la pieza de trabajo.

2.3.2 Maquinado ultrasónico (MUS)

Este proceso se usa para trabajar con materiales duros y quebradizos que son difíciles de trabajar con otros métodos. También conocido como esmerilado por impacto, este proceso se basa en el impacto de granos de abrasivo lanzada por una herramienta cortante oscilatoria contra la superficie de trabajo. (como se observa en la figura 2.3). La herramienta oscila con velocidad ultrasónica (20000 hertz o más), lanza los granos de abrasivo contra los granos de trabajo y ocasiona una acción de esmerilado ó de arranque de viruta que remueve el material. La herramienta oscilatoria ultrasónica produce cavitación en la mezcla del liquido y abrasivo, la cual es necesaria para remover el material. No hay contacto físico entre la herramienta y la pieza de trabajo. Es un proceso que se dificulta para el barrenado, corte, ataque químico, y pulido, ya que sirve como un proceso para crear relieves sobre las superficies, un ejemplo de esto son las monedas, ya que realiza orificios pequeños de 0.08 mm (0.003 in). Para barrenar el tamaño máximo disponible se dependerá de la potencia de la máquina, si su potencia es de 2.4 Kw se tendrán diámetros de alrededor de 90 mm (3.5 in). El maquinado ultrasónico es mas ventajoso cuando es aplicado en orificios de placas delgadas, o en cavidades irregulares. No es adecuado para materiales que no se recomiendan para este proceso, como son materiales frágiles y materiales para soplado.

Cantidad de producción y costo.-

El maquinado ultrasónico es un método relativamente lento, el costo de sus herramientas y equipo es moderado, sin embargo la selección del proceso particularmente no tiene base sobre la cantidad de producción.

Materiales adecuados para la aplicación del proceso.-

Es útil para materiales duros, no conductores, este proceso es primordial y adecuado para materiales no metálicos tales como vidrio, ferrita, germanio, carburo de tungsteno, carbono y grafito, cuarzo, cerámica, rubí sintético, carburo de boro y acero para herramientas.

Tolerancias recomendables.-

Las tolerancias dimensionales recomendadas para el MUS en superficies es de ± 0.025 mm (± 0.001 in). Sin embargo se pueden obtener de ± 0.013 mm (± 0.0005 in) si es necesario.

Una superficie terminada podrá tener tolerancias de $1 \mu\text{m}$ ($40 \mu\text{in}$) pero a muy bajos cortes, los abrasivos finos pueden producir superficies tan finas como $0.25 \mu\text{m}$ ($10 \mu\text{in}$).

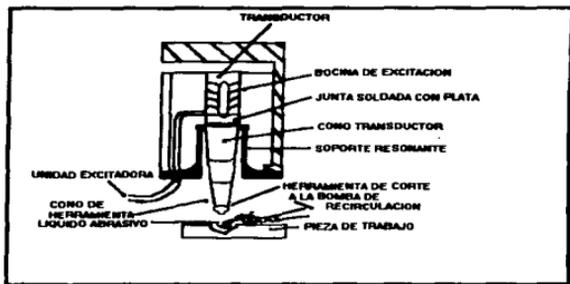


Fig. 2.3 Diagrama de los elementos principales de un sistema de maquinado ultrasónico.

La rapidez de remoción de material con maquinado ultrasónico depende de la frecuencia y amplitud de las oscilaciones de la herramienta, la fuerza de impacto y el tamaño de los granos, la rapidez de remoción de material es proporcional al cuadrado de la amplitud de las oscilaciones; la frecuencia también influye en la velocidad de remoción, sobre todo en materiales quebradizos, en los cuales se tiene mayor remoción de material cuando más alta es la frecuencia. Los materiales más utilizados para este tipo de herramientas son aceros suaves, acero de aleación, recocido y acero inoxidable. Entre los abrasivos de uso más general están el carburo de boro, el carburo de silicio y el óxido de aluminio; entre estos el boro es el de acción cortante más rápida.

Algunas de la ventajas de este proceso son:

- 1) permite libertad de diseño en las piezas.
- 2) permite reparar o modificar matrices de acero endurecido sin recocerlos.
- 3) reduce el tiempo de maquinado.
- 4) produce piezas repetidas, uniformes.
- 5) es seguro en su funcionamiento.
- 6) no altera las propiedades de la pieza maquinada.

Entre sus limitaciones se encuentran;

- 1) remoción lenta del material.
- 2) la profundidad de la marca está limitada por la circulación del líquido cortante.
- 3) desgaste y roturas de herramientas.

A continuación se presenta una tabla que involucra la velocidad y el volumen de material removido para los diferentes tipos de materiales que se pueden marcar con MUS.

Materiales	Volumen de material removido por minuto, cm ³ (in ³)	Velocidad de avance de la herramienta, cm (in)
Vidrio	3.87 (0.236)	0.38 (0.150)
Ferrita	3.21 (0.196)	0.32 (0.125)
Mica	3.21 (0.196)	0.32 (0.125)
Germanio	2.18 (0.133)	0.22 (0.085)
Grafito	2.05 (0.125)	0.20 (0.080)
Cuarzo	1.87 (0.102)	0.17(0.065)
Cerámicos	1.54 (0.094)	0.15(0.060)
Carburo de boro	0.39 (0.024)	0.038 (0.015)
Carburo de tungsteno	0.36 (0.022)	0.036 (0.014)
Acero para herramientas	0.26 (0.016)	0.025(0.010)

Tabla 2.4. Parámetros de corte para MUS.

2.3.3 Maquinado electroquímico (MEQ)

Este proceso se basa en una celda electroquímica de Faraday, la cual consta de un ánodo, un cátodo y el electrolito. Además de la celda básica, el sistema tiene algunos componentes mecánicos para circular el electrolito y para colocar el electrodo que es la herramienta de corte.

(figura 2.4). Para producir la acción electroquímica, el electrodo se conecta con el polo positivo de la fuente de corriente que constituye el cátodo; la pieza de trabajo se conecta con el polo negativo y forma el ánodo.

Se utiliza como fuente una corriente continua de amperaje constante con bajas fluctuaciones. Cuando la corriente circula por el electrolito que está en movimiento constante, que ocasiona que algunos de los iones del electrolito desprendan iones metálicos de la pieza de trabajo, o sea, lo opuesto de la deposición. Los iones metálicos se enlazan con los iones del electrolito, entran en una solución y se separan del entrehierro formado entre la herramienta y la pieza de trabajo. Esta acción electroquímica es la fuerza cortante básica en este proceso.

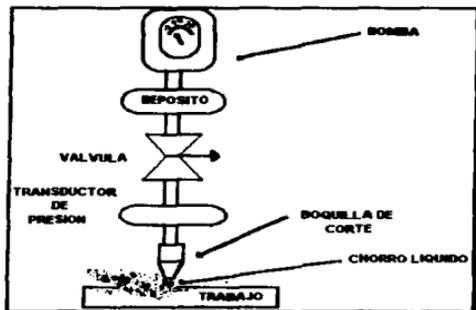


Fig. 2.4. Diagrama del proceso para remoción de materiales con chorro líquido.

La remoción de material y el avance del electrodo para diversos metales pueden calcularse con exactitud razonable. El electrolito es otra variable crítica en la electroquímica, porque influye en la velocidad de remoción de material. Para tener un funcionamiento eficiente, el electrolito debe tener ciertas características que son:

- 1) buena conductividad eléctrica para facilitar el paso de corriente.
- 2) ser de bajo costo para disminuir el costo de operación.
- 3) de fácil disponibilidad.
- 4) por seguridad no ser tóxico.

5) no ser corrosivo (para evitar la corrosión de la pieza de trabajo y la superficie del electrodo). Los electrólitos más comunes son cloruro de sodio en agua, nitrato de sodio, cloruro de potasio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico y clorato de potasio. Entre las ventajas del maquinado electroquímico es de que casi no tiene desgaste de electrodos, el maquinado se hace a menos de 98°C y se logran formas complejas con un movimiento axial concentrado en áreas pequeñas de la pieza de trabajo. Algunas limitaciones son el alto costo inicial, el alto costo de los electrodos y problema de lodos, tolerancias de (0.127 a 0.050) mm (0.005 a 0.002 de in), requiere de dispositivos costosos para sujetar la pieza de trabajo y los problemas de corrosión y seguridad.

Aplicaciones y capacidades .-

Este proceso es recomendable para materiales y objetos que son difíciles de maquinar por métodos convencionales. Una aplicación común es la producción de agujeros profundos de diámetro pequeño. El agujero mas pequeño puede tener una medida de alrededor de 0.25 mm (0.01 in) de diámetro, aunque medidas de 0.8 a 3 mm (0.03 a 0.125 in) son más recomendables. La profundidad del agujero puede ser 50 veces o mas de su diámetro.

La dureza del material no reduce el rango de corte, los tratamientos térmicos y los trabajos de dureza en un material pueden hacer el proceso mas sencillo, una o varias cavidades pueden hacerse simultáneamente. Dependiendo del equipo que se use, se pueden hacer operaciones como: torneado, treflado, fresado, perfilado, ranurado, esmerinado, grabado y marcado. El recubrimiento de los electrodos y el control del maquinado pueden crear contornos internos, los cuales son extremadamente difíciles de hacer por otros métodos. El MEQ es usado para hacer partes para motor, boquillas, levas, formación de dados, quemadores y otros objetos. En la aeronáutica tiene actualmente un gran número de aplicaciones. Las superficies que logra el proceso están libres de asperezas con las esquinas bien terminadas. El proceso logra también maquinados en el que las piezas están libres de esfuerzos inducidos adicionales. Otra ventaja mas es que las superficies quebradizas quedan libres de oxígeno.

Cantidad de producción y costo .-

El montaje del equipo puede durar indefinidamente y requiere de un mantenimiento menor, este hecho compensa la alta inversión inicial requerida por el equipo de MEQ. Los rangos de remoción de material hacen a este proceso el más adecuado para los altos volúmenes de producción. Sin embargo como se requiere de una alta potencia en este proceso se tienen otros costos. El proceso no es competitivo con el maquinado convencional al para materiales normales en general puede ser competitivo para el maquinado de piezas duras y formas complejas.

Materiales adecuados para el empleo de MEQ.-

El MEQ requiere de materiales que son eléctricamente conductores. Todos los metales incluyendo hierro colado, acero, cobre y sus aleaciones, aluminio y otras aleaciones pueden ser procesados. Cada vez que el maquinado convencional presente problemas de su acabado superficial, el uso del proceso de MEQ en este caso es el más adecuado.

Tolerancias recomendables.-

Un aspecto importante en las piezas terminadas es el factor dimensional, en el cual influye la densidad, el voltaje, flujo electrolítico, temperatura, presión electrolítica, desviaciones en la precisión del electrodo. Sin embargo se cuenta con unas tolerancias dimensionales cerradas que son aplicables al proceso las cuales se presentan en la siguiente tabla.

En la tabla se muestra las dimensiones y contornos que se pueden obtener con el maquinado MEQ.

	Tolerancia normal	Tolerancia exacta
<i>Dimensiones específicas</i>	+/-0.05(+/-0.002 in)	+/-0.013 mm (+/-0.0005 in)
<i>Contornos</i>	+/-0.13 mm (+/-0.005 in)	+/-0.05 mm (+/-0.002 in)
<i>Superficies terminadas</i>	1.6 µm	0.4 µm
<i>Superficies terminadas (lado de la pared)</i>	3.0 µm	1.6 µm

Tabla 2.5. Se muestran las tolerancias del proceso de maquinado MEQ.

2.3.4 Esmerilado electroquímico (EEQ)

Es el esmerilado electroquímico otro de los procesos electroquímicos para remoción de materiales. En teoría, puede considerarse como una combinación de electrograbado y esmerilado simultáneos a alta velocidad. En el esmerilado electroquímico se utiliza una rueda de esmeril conectada con el polo negativo (cátodo) de una fuente de corriente continua, la pieza de trabajo conectada al polo positivo (ánodo) y el electrólito en circulación constante para formar la celda electroquímica básica.

La rueda abrasiva es de acero; las partículas del abrasivo aislante forman entrehierro necesario entre la rueda y el trabajo. Se hace pasar el electrólito por este entrehierro para producir una acción electroquímica, y abrasiva, aunque la abrasión elimina poco material. Por tanto, el esmerilado electroquímico implica remoción de material. Este proceso sirve para cualquier trabajo como esmerilado de caras, de superficies, internas y externas, y en menor grado, para la formación de partes.

El esmerilado electroquímico es aplicable para piezas frágiles y difíciles de trabajar con métodos convencionales, piezas sensibles al calor que se dañan con el roce de la rueda abrasiva, herramientas de carburo, corte de componentes, corte de laminaciones y tubos delgados y esmerilado de ranuras en mandriles y piezas roscadas.

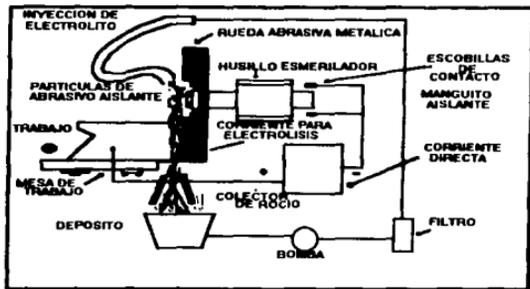


Fig.2.5. Diagrama del esmerilado electroquímico.

Entre las ventajas del esmerilado electroquímico están las piezas sensibles al calor que pueden esmerilarse en frío, el trabajo está libre de rebabas, puede predecirse la duración de la piedra abrasiva, pueden esmerilarse piezas frágiles y delgadas como panales y tubos de pared delgada sin deformación; el bajo costo de la rueda abrasiva y el mínimo tiempo perdido reducen el costo total de operación. Algunas de sus limitaciones son: se necesita una superficie ancha de contacto para aumentar el amperaje, sólo pueden esmerilarse ciertas formas; no es práctico taladrar agujeros muy pequeños, se necesita limpiar y rectificar las ruedas con más frecuencia (Como puede verse en la fig. 2.5).

Aplicaciones.-

La mejor aplicación del EEQ es el afinado de herramientas de carburo para corte. En esta aplicación, el proceso tiene un esmerilado mucho más rápido que los métodos convencionales y las piezas quedan sin rebaba, libres de esfuerzos mecánicos y no se alteran por el calor. Las ruedas cuestan alrededor del 20% menos que lo que cuestan los discos de diamante, porque su uso en el proceso es muy eficiente.

Este proceso se usa en materiales que son frágiles y susceptibles a daños por calor o a distorsión por esfuerzos normales en el esmerilado. Como ejemplos están materiales de paneles aéreos, material quirúrgico, tubos con paredes delgadas, materiales laminados y placas muy delgadas de 1.5 mm (1/16 in) las cuales tienen tolerancias muy cerradas y tendencias a la distorsión después del esmerilado. El proceso es adecuado para superficies lisas y cilíndricas.

Cantidades de producción y costo.-

El pulido electroquímico tiende a ser caro porque el costo es grande en la protección de la corrosión por la solución electrolítica y en el circuito eléctrico. Una vez que el proceso comienza a funcionar la inversión puede ser justificable. En altos volúmenes de producción el proceso de EEQ es el más recomendable. Normalmente los rangos de remoción de material con EEQ son de 1.6 cm³/min, 1000A. Los rangos varían con los diferentes materiales.

Materiales disponibles para la aplicación de el proceso.-

Como en el MEQ, el esmerilado electroquímico requiere que la pieza de trabajo sea eléctricamente conductora: carburos, aceros duros y aceros para herramientas.

En la tabla se muestra las dimensiones y contornos recomendables para el marcado con MEQ.

Tolerancias recomendables	Tolerancias recomendables	Tolerancia exacta
Dimensiones específicas	+/-0.25 mm	+/-0.013 mm
Contornos	+/-0.13 mm	+/- 0.05 mm
Sup. finales (esmerilado lateral)	0.40 µm	0.25 µm
Sup. terminada, acero	0.75 µm	0.40 µm

Tabla 2.8. Se muestran los contornos y dimensiones para MEQ.

2.3.5 Maquinado o fresado químico (FEQ)

En este proceso se efectúa la remoción de material por la acción de un mordente y su uso principal es para piezas planas, delgadas, casi de cualquier configuración.

La cantidad de material removido o la profundidad del fresado se controlan por el tiempo de inmersión de la pieza en el mordente, para controlar las partes que no se van a fresar, se utiliza un protector. Los pasos básicos a seguir son: limpieza del material, aplicación del protector, realización para el trazado pertinente, fresar la pieza y quitar el protector. La limpieza de la superficie es importante para tener buena adherencia del protector. Se eliminan todos los óxidos, aceite o grasa de la superficie.

Se prefieren los procesos de desengrasado con disolventes o con vapor, que a veces puede ser necesario usar medios más fuertes para la limpieza como el fresado instantáneo o la limpieza alcalina. Después de la limpieza hay que enjuagar muy bien las piezas para eliminar todos los residuos de disolventes o mordentes que queden en ellas.

La aplicación del protector puede ser con mascarilla, fotoprotectores (o por el proceso de inmersión), por aspersión o con rodillos. Puede ser necesario aplicar más de una capa, según el material y el mordente. Después de aplicar el protector se deja secar o curar. Si se utiliza mascarilla protectora, el siguiente paso es trazar la imagen de la pieza que se va a grabar. Se dibujan las imágenes de las piezas en la superficie de trabajo por medio de plantillas para guiar el trazado con un buril o rascador, si se usa fotoprotector, las imágenes se reproducen fotográficamente en la superficie y no hay que trazarias. Después de lograr el grabado y cortes deseados, se lavan las piezas para eliminar todos los residuos de mordente de la superficie.

El paso final es quitar el protector, lo cual puede hacerse al desprenderlo con la mano o sumergir la pieza en un disolvente. Después se limpian las piezas y se someten al trabajo adicional necesario.

El maquinado químico es un proceso de relativa precisión, con tolerancias dimensionales promedio de 0.025 a 0.0127 mm (0.001 a 0.005 in). La profundidad del grabado puede variar entre 0.025 y 12.7 mm (0.001 a 0.500 in). El proceso ofrece más facilidad para el diseño y no está limitado a materiales metálicos pueden procesarse piezas pequeñas y grandes en la misma forma. El proceso se presta más para piezas como placas de nombre, tableros de instrumentos, circuitos impresos, componentes electrónicos, pieles de alas de avión y otros.

Algunas de sus limitaciones son que es difícil de controlar el corte en las esquinas; las esquinas internas quedan redondeadas y externas con bordes agudos. Con algunos materiales es difícil controlar el acabado de la superficie así como los agujeros y cortes profundos y estrechos. El maquinado o fresado químico se muestra esquemáticamente en la figura 2.6.

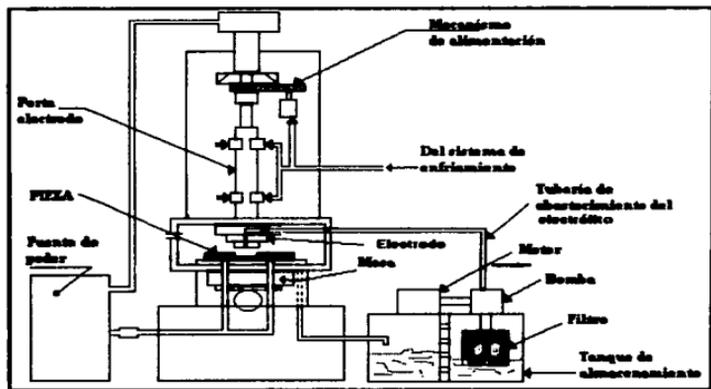


Fig. 2.6. Diagrama del maquinado o fresado químico.

Cantidades de producción y costo.-

Normalmente es más ventajoso en bajos niveles de producción, el costo del equipo y el de la herramienta es relativamente bajo, para cantidades modestas de producción suele ser atractivo.

El costo del equipo es bajo comparado con el maquinado convencional, a pesar de existir el problema de la corrosión y de sustancias contaminantes en los materiales. Otros aspectos que intervendrían en el costo inicial, es el costo de los químicos y de los materiales de recubrimiento.

Materiales disponibles para la aplicación del proceso.-

En general un material que puede ser grabado también puede ser químicamente maquinable en muchos metales ferrosos y no ferrosos, los no metálicos son menos manejables. El proceso fue originalmente desarrollado para aluminio y sus aleaciones pero fue extendido para aceros al carbono, acero para herramientas, latón, cobre, aleación de níquel y otros metales. Es importante considerar para el proceso, el tamaño de grano, linealidad interna y calidad de la superficie (libre de elementos corrosivos).

Dimensiones y tolerancias recomendadas.-

Pueden lograrse tolerancias muy cerradas con el fresado químico, por medio de este proceso se logran superficies exactas.

En la tabla se muestra la profundidad de corte y tolerancias recomendadas para el maquinado FEQ.

Profundidad de corte en mm (in)	Tolerancia recomendada en mm (in)
arriba de 2.15(0.085)	+/-0.25 (0.001)
2.16 - 3.05 --- (0.086 - 0.120)	+/-0.038(0.0015)
3.06 - 3.94 --- (0.121 - 0.120)	+/-0.050(0.002)
3.95 - 4.89 --- (0.156 - 0.190)	+/-0.064 (0.0025)
4.85 - 5.84 --- (0.191 - 0.230)	+/-0.076 (0.003)
5.85 - 7.10 --- (0.231 - 0.280)	+/-0.089 (0.0035)
7.11 - 8.65 --- (0.281 - 0.340)	+/-0.102 (0.004)
8.66 - 10.16 --- (0.340 - 0.400)	+/-0.114 (0.0045)

Tabla 2.7. Tolerancias y profundidad de corte para FEQ.

2.3.6 Proceso de remoción de materiales por electrodescarga (MED)

El proceso de electrodescarga se conecta a una fuente de corriente directa a pulsaciones entre dos conductores (electrodo y la pieza de trabajo) y se aplica un voltaje durante un tiempo suficiente a través del entrehierro determinado entre el electrodo y la pieza de trabajo. Los electrones producen una chispa que cruza el entrehierro y funde una pequeña cantidad del metal del electrodo (que es herramienta) sobre la pieza de trabajo. Si esta acción se controla dentro de un líquido dieléctrico, la energía de los impulsos puede concentrarse en un área pequeña removiendo al metal con un total desprendimiento. Por tanto la electrodescarga es un complejo proceso termoeléctrico en el cual la velocidad de remoción de material depende de las características de la energía de impulsos, del entrehierro, de las características de la combinación de electrodo y pieza de trabajo y de las características del líquido dieléctrico (como se muestra en la figura 2.7). La electrodescarga sólo se utiliza en metales y sus aleaciones y no puede emplearse con materiales no metálicos.

La corriente directa a pulsaciones se utiliza para cargar los capacitores que liberan el voltaje que produce la chispa. Las chispas individuales ocurren a frecuencias hasta de 10 000 Hertz y la corriente es de más de 10^6 amperes por in^2 . El volumen de remoción depende del amperaje. El acabado de superficie va en relación con la frecuencia de las descargas de chispas.

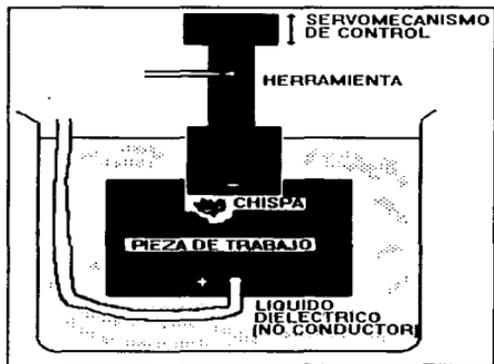


Fig. 2.7. Diagrama de un sistema de maquinado por electrodescarga.

El líquido dieléctrico es una variable importante, su función principal es concentrar la energía de impulso de cada chispa en los puntos más cercanos entre el electrodo y la pieza de trabajo. Además, tiene otras tres funciones:

- 1) sirve para arrastrar las virutas.
- 2) enfría la pieza de trabajo.
- 3) aísla el electrodo y la pieza de trabajo. El dieléctrico influye en el desgaste del electrodo, la velocidad de remoción de material y el calentamiento en la zona de trabajo.

Los líquidos dieléctricos usados son aceites mineral simple y de silicones, queroseno, etilenglicol, líquidos polares, glicerol, agua y soluciones de silicato de sodio. Por ser un proceso térmico la electrodescarga, el calor influye en la superficie de trabajo, la cual se funde. El efecto de calor en la superficie es más intenso con alta velocidad de remoción de material; puede disminuirse con menor velocidad de trabajo y con uso de electrodos que produzcan condiciones estables de trabajo. La superficie maquinada con electrodescarga tiene dos capas en la zona tratada por el calor: la capa externa, de dureza relativa y la capa interna, menos modificada por el calor y de menor dureza.

El material del electrodo es una de las variables críticas y hay que tener cuidado al seleccionarlo. El grafito es uno de los materiales para electrodos más utilizados; la razón es que no se funde como los electrodos metálicos sino que pasa directamente a la fase de vapor. También se utilizan cobre, aluminio, manganeso y zinc.

Cantidad de producción y costo.-

Como se tiene una baja remoción de material en este proceso uno de las características más importantes es la producción de alambre, aunque a veces el maquinado convencional puede resultar más económico, ya que en la remoción de material se considera el costo del electrodo, por su rápido desgaste. El bajo rango de corte es compensado por la gran facilidad de maquinado.

Materiales recomendados para la aplicación del proceso.-

La dureza no determina la aplicación del material para corte en el MED, pero los altos rangos de dureza hacen al maquinado convencional más costoso y al MED más atractivo. La conductividad eléctrica es esencial en el proceso. El acero de alta dureza y el carburo de hierro son los más comunes en este proceso, otros materiales son latón, cobre, grafito y aluminio.

Dimensiones y tolerancias recomendadas.-

La superficie terminada por el MED es un primer resultado de factores eléctricos. La corriente eléctrica, altas frecuencias y pulsos cortos logran un acabado fino. Normalmente las especificaciones de la superficie terminada requieren un acabado no menor de $0.8 \mu\text{m}$ ($30 \mu\text{in}$), sin embargo con el MED se logran superficies terminadas de $0.4 \mu\text{m}$. La exactitud dimensional del electromaquinado de piezas depende de muchos factores, uno de los más importantes es el gasto en el electrodo, precisión de maquinado y habilidad del operador.

Las tolerancias de ± 0.0025 a 0.013 mm (± 0.0001 a ± 0.0005 in) son posibles bajo circunstancias favorables en el proceso, aunque las tolerancias recomendadas están en el rango de ± 0.05 a ± 0.13 mm (± 0.002 a ± 0.005 in).

2.3.7 Remoción de material con haz de electrones (MHE)

Se basa en la teoría del movimiento de electrones. Los electrones son generados en un cañón de electrones donde se aceleran a gran velocidad con alto voltaje para formar un haz estrecho y redondo, al cual se dirige y enfoca un campo electromagnético para bombardear la pieza de trabajo con una velocidad más o menos equivalente a la mitad de la velocidad de la luz. Cuando el haz de electrones a alta velocidad bombardea la superficie de trabajo, su energía cinética se transforma en energía térmica produciendo un calor suficiente para fundir o vaporizar el material en el punto de contacto como se muestra en la (fig. 2.8).

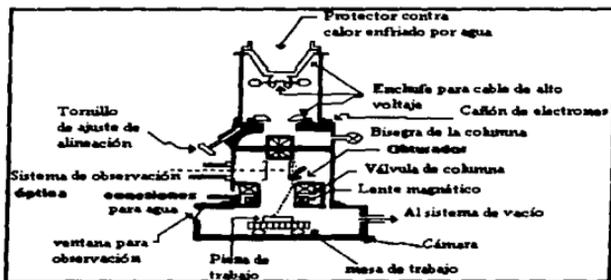


Fig. 2.8. Diagrama de una columna de cañón de electrones y sus partes principales para la aplicación en maquinado con haz de electrones.

El cañón de electrones consta del cátodo, el filamento incandescente de tungsteno, el emisor de electrones y el ánodo. Los electrones emitidos por el filamento de tungsteno tienen carga negativa y pasan por el ánodo que tiene la carga positiva. Este fenómeno acelera los electrones y les imparte la elevada energía cinética que se transforma en energía térmica durante el choque.

Como esta emisión de electrones produce rayos X, toda la unidad necesita un blindaje de plomo para absorber la radiación. Además, si se requiere movilizar el trabajo durante el proceso, se debe utilizar equipo de control remoto.

Este proceso se ha utilizado para taladrar agujeros de 0.127 a 0.025 mm (0.005 a 0.001 in) de diámetro en material con espesor de 0.254 a 3.175 mm (0.010 a 0.125 in). Para fresar y ranurar, la pieza de trabajo permanece estacionaria y se programa el haz de electrones para que se mueva y corte el perfil requerido. El haz puede cortar acero, cerámicas y vidrio. Pero con elevados niveles de energía térmica que se logran en cualquier material conocido puede vaporizarse o fundirse en forma instantánea.

Este proceso es el adecuado para cortes relativamente delgados de la pieza de trabajo, este maquinado es lento a comparación de otros procesos. La abertura mas pequeña es de 0.013 mm (0.0005 in) de diámetro, y su espesor es prácticamente de 0.025 mm (0.001 in).

Cantidad de producción y costos.-

La velocidad del corte es rápida para materiales muy delgados, ya que produce diámetros de 0.1 mm (0.004 in) en décimas de segundo, lográndose ranuras de 0.05 mm (0.0020 in) de ancho con un espesor del material de 0.25 mm (0.010 in) y una velocidad de remoción de material que va desde 65 a 150 mm³/min (2.5 a 6 in³/min) además de tener un gasto volumétrico de 0.8 a 2 mm³/min (0.00005 a 0.00012 in³/min). El tiempo adecuado para evacuado de la cámara para la carga de la máquina es un factor que hace crecer el tiempo de producción, lo que ocasiona que se tenga un alto costo en las producciones grandes, el costo del equipo es elevado, así como la necesidad de especialización del operador.

Materiales recomendables para la aplicación del proceso

Para maquinado con haz de electrones se recomiendan los siguientes materiales tales como metales, cerámicos, plásticos y compuestos. Aunque para los siguientes materiales la velocidad de corte es muy lenta, como aceros duros, aceros inoxidables, molibdeno, níquel, cobalto, titanio, tungsteno y sus aleaciones, cuarzo, y zafiro sintéticos.

Tolerancias recomendables.-

Una tolerancia de +/- 10% debe ser dada para diámetros y anchos pequeños. Las especificaciones normales para una superficie terminada podrían ser de 2.5 µm (100 µin), aunque en superficies tan fina como 0.5 µm (20 µin) pueden ser producidas en condiciones óptimas.

2.3.8 Remoción de material con rayo láser (MHL)

Se ha permitido el uso de este potente y adaptable dispositivo a muchas aplicaciones industriales, incluso la remoción de material. Sus características del láser básico son:

- 1) en alto grado de direccionamiento.
- 2) es altamente monocromático, con una sola longitud de onda.
- 3) tiene la capacidad para generar potencias máximas elevadísimas.

El haz de luz del láser se colima (enfoque con máxima definición) porque sus haces son casi paralelos entre sí y solo tienen una ligera divergencia en su trayectoria. Debido a la pequeña divergencia de los haces, el rayo láser puede enfocarse y producir una luz de gran intensidad capaz de producir temperaturas que funden o vaporizan cualquier material conocido, incluso un diamante. Por tanto, la salida del láser es altamente direccional, ya que es monocromática y coherente a la vez. De esta manera toda la energía de los haces láser puede concentrarse con aparatos ópticos sencillos y enfocar la superficie de trabajo en el proceso de remoción de material con rayo láser.

El proceso se basa en la emisión de fotones de los átomos cuando los electrones cambian de niveles de energía. Los electrones de las órbitas del átomo saltan a nivel más alto de energía, es decir, las órbitas más cercanas al núcleo absorben cantidades discretas o fijas de estímulo. La energía adicional puede transmitirse al átomo por calentamiento, descarga eléctrica o por radiación desde otros átomos que ya han adquirido energía adicional. La energía adicional del láser se transmite a los átomos por radiación. Cuando los electrones orbitales del átomo cambian de un nivel de energía bajo a uno más alto, se "excita" el átomo e irradia un cuanto de energía. Si el electrón absorbe otro cuanto de energía mientras el átomo está excitado, se irradian dos cuantos de energía y el electrón cae a un nivel más bajo de energía. La energía irradiada en esta forma tiene la misma longitud de onda que la energía de estímulo, por tanto se atrapa, amplifica e intensifica la energía de estímulo para producir un haz de alta potencia. Este es el principio en el cual se basa el proceso de remoción de material con rayo láser.

Se utilizan dos tipos básicos de sistemas láser para remoción de materiales: el láser de estado sólido y bombeo óptico o láser de rubí y el láser molecular continuo de $\text{CO}_2\text{-N}_2$ o láser de gas; éste es un sistema con grandes promesas para el futuro. El láser de rubí fue uno de los primero y es el que más se usa (fig. 2.9).

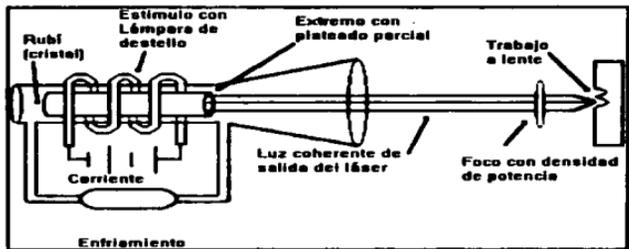


Fig. 2.9. Diagrama de un sistema típico de láser rubí utilizado para procesos de remoción de material.

La acción láser de este sistema empieza cuando se excita un átomo con la lámpara de destello y emite un fotón, es decir, un fotón de energía, paralelo al eje del rubí. Este fotón emitido excita a otro átomo en su trayectoria para aportar otro fotón, sincronizado y en el mismo sentido. Este proceso continúa hasta que todos los fotones se reflejan de ida y vuelta entre los extremos del rubí. El rayo va aumentando hasta que la amplificación es suficiente para pasar por el espejo con plateado parcial en el lado derecho del rubí, lo cual produce un haz de luz estrecho, paralelo, concentrado y coherente, listo para enfocarlo con el lente hacia su superficie de trabajo.

Entre las operaciones que se efectúan con el rayo láser están: taladrado de agujeros, corte de ranuras y formación de diversos contornos. Los materiales que trabajan con láser son metálicos y no metálicos, pero también es posible "cortar", vaporizar o fundir cualquier material con el haz de láser. El proceso con láser tiene un futuro más prometedor que cualquier otro sistema de micromaquinado.

El maquinado con haz de láser es un proceso el cual puede ser aplicable a la soldadura. el proceso es operado con un alto nivel de energía, es decir el haz de luz es enfocado bastante ancho y con alta intensidad disolviendo así al material del punto en el cual choca. Es típico que el enfoque sea ubicado sobre la pieza de trabajo con un ancho de 25 a 50 μm (0.001 a 0.002 in). Además, la cantidad de densidad energía es grande de millones de Watts por centímetro cuadrado. El gas de proceso más común que se utiliza es el oxígeno ya que proporciona un corte más rápido y deja un mejor acabado en la superficie.

Aplicaciones y características.-

El Maquinado con haz de láser es comúnmente usado para el maquinado de alta precisión o micromaquinado de piezas delgadas que son difíciles de maquinar por métodos convencionales. Los agujeros muy pequeños de 3 mm (1/8 in) y muy delgados de 5 mm (0.200 in) nos proporcionan los mejores resultados. El barrenado de agujeros de diámetro pequeño y gran profundidad es una aplicación particularmente ventajosa. Ejemplos comunes del MHL son el barrenado de agujeros de 0.1 mm (0.004 in) en lentes de contacto, el barrenado de agujeros de diámetros de 0.13 mm (0.005 in) en rociadores plásticos de los aerosoles, también sirve para ajustar el espesor de la película delgada de silicio en la cual van los resistores que después son colocados en una base de un cerámico para formar los microcircuitos electrónicos, y para marcado de contornos de corte en telas para prendas de vestir.

El proceso MHL tiene la ventaja de poderse usar en zona inaccesibles. Puede operar en materiales transparentes y con varias atmósferas. El diámetro mínimo es de 0.005 mm (0.0002 in), pero 0.13 mm (0.005 in) es el más común. Los rangos de longitud contra diámetro de arriba de 50:1 son posibles con agujeros de diámetro de 0.13 mm (0.005 in). Son posibles agujeros con un ángulo 15°. Son usados anchos y perfiles de corte desde 0.1 mm (0.004 in), a 0.4 mm (0.015 in) y sus valores mejoran para muchas aplicaciones. Para muchos materiales el máximo espesor de corte es de 5 mm (0.200 in), aunque es posible lograr cortes de 13 mm (0.5 in) en algunos casos.

Cantidad de producción y costos.-

El maquinado con haz de láser es un proceso de alto costo. Los rangos de corte son bajos en comparación con los métodos convencionales de maquinado. Tiene una eficiente utilización de energía en comparación con los demás procesos. Los rangos de corte varían con los materiales pero en promedio está en 0.006 cm³/min (0.0004 in³/min). No obstante, los orificios en un material delgado requieren centésimas de segundo. El corte es más rápido cuando el gas asistente es parte del proceso.

Materiales adecuados para aplicación del proceso.-

Todos los materiales son maquinables con este proceso. Los más prácticos para el proceso de MHL son materiales que son difíciles de cortar por métodos convencionales. Los cerámicos, vidrio, y carburos, caen dentro de esta categoría. El cobre, aluminio, oro, y la plata no son adecuados para el proceso por su alta conductividad térmica y alta reflectividad.

El titanio es el material más común para ser maquinado por haz de láser. Otros materiales que pueden ser maquinados satisfactoriamente son plásticos, caucho, berilio, circonio, acero para herramientas, tungsteno, fierro colado, atón, molibdeno, piel, cartón, madera, boro y grafito, y varios materiales laminados.

Tolerancias.-

El diámetro de los orificios y el ancho de corte pueden tener tolerancias de ± 0.025 mm, (± 0.001 in). Cuando el gas reactivo es usado, las tolerancias podrían aumentar a ± 0.1 mm (± 0.004 in).

A continuación se muestra la tabla 2.8, donde se mencionarán las características de los procesos de remoción de materiales no convencionales. Esta tabla proporcionada nos servirá de referencia para ver cual es el proceso más adecuado para nuestro maquinado.

Procesos especiales para la remoción de materiales	Acabado de la superficie	Espesores y anchos de marcado, mm (In).	Tipos de abrasivos	Materiales conformados
Maquinado con chorro abrasivo (MCA).	Como no produce virutas sino polvo el acabado es aceptable.	± 0.13 (± 0.005) dimensiones menores ± 0.05 (± 0.002) Ancho mínimo de 0.13 (0.005)	Oxido de aluminio, carburo de silicio, dolomita y carbonato de sodio	Cerámicos (porcelana, vidrio, cuarzo, zafiro), Tungsteno, aleaciones de cobre-níquel, metales endurecidos (germanio, silicio, y galio)
Maquinado ultrasónico (MUS).	El arranque de virutas, produce cavitación, por lo que se debe tener cuidado con la velocidad de remoción de material y tamaño de grano del abrasivo para que la superficie no quede áspera.	± 0.13 (± 0.005) dimensiones menores ± 0.025 (± 0.001) Ancho de las ranuras 0.75 (0.030)	Carburo de boro, carburo de silicio y óxido de aluminio.	Materiales no conductores (vidrio, zafiro, porcelana, cuarzo, rubi sintético, mica, carburo de tungsteno). Ferrita, germanio, grafito, carburo de boro, y acero para herramientas
Maquinado electroquímico (MEQ).	Es un acabado muy preciso de la superficie, ya que no sufre desgaste ni daños por el calor.	± 0.127 (± 0.0049) dimensiones de espesor. ± 0.13 (± 0.005) contornos.	Electrolitos (cloruro de sodio, nitrato de sodio, cloruro de potasio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico y clorato de sodio.	Hierro colado, acero, cobre y sus aleaciones, y aluminio.
Esmarilado electroquímico (EEO).	Para tener un buen acabado superficial, se tiene que utilizar piezas grandes para que el amperaje del maquinado sea mayor.	± 0.05 a 0.25 (± 0.002 a 0.01) Para profundidad del marcado.	Rueda abrasiva de acero.	Piezas frágiles, toda clase de aceros y aleaciones de bronce.
Maquinado de trizado químico (MFQ).	Para tener un buen acabado se eliminan óxidos, aceites y grasas de la superficie para la eliminación de residuos.	± 0.025 A 12.7 (± 0.01 a 0.500) Para profundidad de grabado.	Mordente	No está limitado a ningún material. Metales ferrosos y aceros para herramienta, aluminio, latón, cobre con aleación de níquel
Maquinado por electrodescarga (MED).	El acabado de la superficie va en relación con la frecuencia de las descargas de las chispas y el tamaño de estas, ya que las más pequeñas producirán mejores acabados.	± 0.05 a 0.13 (± 0.002 a 0.005) Para profundidad de grabado. ± 0.05 a 0.30 (± 0.002 a 0.012) Para ranuras.	Dielectricos (aceites minerales, queroseno, etilenglicol, silicones, glicerinas líquidas, agua y soluciones de silicato de sodio.	Metales y sus aleaciones, bronce, aceros de alta dureza, carburo de hierro, latón, cobre, grafito y aluminio.
Maquinado con haz de electrones (MHE).	El acabado de la superficie es bastante bueno ya que el material se funde por el calor producido por el haz.	± 0.254 a 3.175 (± 0.010 a 0.125) Para profundidad ± 0.025 a 0.127 (± 0.001 a 0.050) Para anchos de marcado	Ninguno	Metales y sus aleaciones, cerámicos, plásticos y materiales compuestos, aceros duros e inoxidables, molibdeno, níquel, cobalto, titanio, tungsteno, cuarzo, zafiro sintético.
Maquinado con haz de láser (MHL).	Fácil control y configuración del marcado como del acabado de la superficie y pequeños daños por calor.	El ancho como la profundidad del marcado dependerán de la potencia de la máquina láser con la que se cuente	Láser (estado sólido) o láser rubi, láser continuo de CO_2-N_2 , láser continuo de Nd-YAG, láser de otro tipo de gases.	Cerámica, hule, plástico, piel, vidrio, aceros para herramientas, mica, madera, hierro colado, latón molibdeno, berilo, caucho, zirconio, tungsteno, grafito, y varios materiales laminados.

Tabla 2.8. Características de los procesos especiales de remoción de materiales.

CAPÍTULO III

MARCADO CON LÁSER

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO DEL LÁSER

La palabra láser es un acrónimo compuesto por las iniciales de las palabras inglesas "light amplification by stimulated, emission of radiation", que significa luz amplificada por la emisión estimulada de una radiación. Todos los equipos láser tienen tres elementos fundamentales: la sustancia emisora, que proporciona átomos, iones o moléculas que producen la amplificación de la luz; una fuente de energía para excitar el medio y un resonador óptico para facilitar la retroalimentación de la luz que se amplifica (como se ilustra figura 3.4), los elementos básicos que se emplean en un láser de bióxido de carbono (CO_2). Para poder operar con una potencia elevada, el rayo láser de CO_2 requiere de una mezcla precisa de tres gases, como son el bióxido de carbono, helio, y nitrógeno, donde el CO_2 es el gas básico que provee la acción molecular necesaria para la generación de fotones. El nitrógeno, gas inerte que mantiene y refuerza la acción molecular. A causa del calor generado al actuar el rayo, la temperatura se eleva tanto que podría fundir el resonador, por eso es que se agrega helio a la mezcla, para que sirva como agente refrigerante. La mezcla de estos gases en un láser de potencia media es de 5% de CO_2 , 15% de N_2 , y 80% He. Esta mezcla es bombeada continuamente a través del resonador para mantener la acción del rayo.

El láser es una fuente de luz de alta intensidad, esta fuente de luz puede ser un gas sólido, La diferencia entre la luz láser y la luz blanca es en que la luz láser es de una longitud de onda individual, nada parecido a la luz blanca que contiene toda la longitud de onda, de ahí, que se tengan muchos tipos de láseres, todos sin excepción son de longitud de onda específica. Los más comúnmente usados en la industria son los láser de bióxido de carbono (CO_2), gas con una Longitud de onda de 10.6 μm , y el láser Nd:YAG (Neodimio: Yttrium-Aluminium-Garnet) con una de longitud de onda de 1.06 μm .

Los láser pueden operar con modo de onda continua (donde el haz se emite sin interrupción), y donde la energía del haz no debe variar con el tiempo, o en modo pulsado (el haz se emite periódicamente). Algunos láseres de onda continua puede ser usada como pulsos a "Q-interruptor" (óptica-acústica interruptor) que provee una alta frecuencia de pulsos (típicamente a 10 Hz) de muy corta duración (típicamente menor que un microsegundo) con potencia pico a 10 tiempos de potencia promedio del láser.

La luz amplificada nos indica de inmediato que estamos dentro del espectro electromagnético, en el campo de la luz, donde la luz es un fenómeno ondulatorio y cuántico. Partiendo del concepto básico de que cualquier emisión luminica se produce por la emisión de un cuanto de energía, o fotón desde un emisor, este fotón describe una trayectoria reproduciendo en todo las características del movimiento ondulatorio dentro del campo electromagnético. Se pueden efectuar algunas intervenciones en el emisor con *p+10Xel fin de estimular la propia emisión para evitar que se produzca en forma espontánea. Esta posibilidad de intervención artificial sobre el proceso de descarga del emisor, y la consiguiente emisión del fotón, definirá la posibilidad de obtener la emisión láser, para estudiar cualquier emisión de luz se deberán tomar en cuenta, los parámetros de calibración de cualquier movimiento ondulatorio comunes a la emisión o producción de cualquier fenómeno ondulatorio electromagnético, los cuales son: **Amplitud** (La amplitud es la distancia máxima que hay entre una cresta y un valle). **Periodo** (Es el tiempo que se requiere para que pase un ciclo completo (cresta-valle-cresta) por un punto fijo de referencia en el espacio). **Frecuencia** (Es el número de ondas que pasan por un punto dado en el espacio en la unidad de tiempo, es recíproco del periodo). **La longitud de onda** (Es la distancia a la que se repite la forma de onda, dicho de otra manera, es la distancia que hay entre dos puntos del mismo movimiento ondulatorio que se encuentran en la misma posición situados consecutivamente uno tras otro, es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos). Los fenómenos electromagnéticos se caracterizan porque su velocidad de propagación es constante ($c=300,000 \text{ Km/s}$). La diferencia entre los diversos tipos de radiación electromagnética está dada por los valores de los parámetros: la longitud de onda y frecuencia de la radiación.

El proceso de la emisión láser podría expresarse en una forma simplificada, como la esencia del fenómeno de la emisión láser que está determinada, por la capacidad que tienen los fotones para estimular la emisión de otros fotones, cada uno con igual longitud de onda y dirección de desplazamiento que el primero.

Conforme a la teoría cuántica, los átomos y las moléculas tienen niveles de energía definidos, donde un electrón puede saltar de su orbital de baja energía a otro orbital de mayor energía (un orbital más alejado del núcleo) al absorber un fotón de energía que lo estimule, cuando esto ocurre, se dice que el átomo se encuentra excitado, y puede entonces emitir o radiar la energía absorbida, cuando se realiza esto, el electrón regresa a su órbita original (estado base) o a un nivel intermedio. Esto sucede sólo si el átomo se encuentra excitado, entonces el electrón absorbe otro fotón de energía, pero con la emisión espontánea, se radiarán dos fotones y el electrón caerá a un nivel de energía más bajo.

La energía radiada, tiene precisamente la misma longitud de onda que la energía estimulante, pero la generación del rayo láser requiere de elementos de un medio que contenga átomos o moléculas que puedan ser excitados y actuar como amplificador, por ejemplo puede ser, una mezcla de gases de helio, nitrógeno y bióxido de carbono a una cierta presión para que sean estimuladas, con una fuente de energía para llevar a los átomos al nivel de excitación. Cuando en un estado en el cual el número de átomos en el nivel superior de energía sea mayor que la de nivel inferior se le llama "inversión de población". Siempre que un fotón pase cerca de otra partícula será estimulada para que emita otro fotón, que será idéntico en longitud de onda, fase y coherencia espacial al primero. Ambos fotones son ahora capaces de estimular la emisión de más fotones semejantes a ellos mismos y éstos también formarán parte de la cantidad creciente de fotones, donde la emisión láser empieza cuando hay suficientes fotones dentro de la barra de cristal, los cuales requieren también de un sistema óptico de enfoque de dos espejos que concentran su energía. (Como se muestra en la figura 3.1 y 3.4).

La operación del láser de CO_2 es basada en el cambio de energía entre un nivel de inferior y otro superior, esto debido a la rotación vibracional. Aquí, el medio activo es una mezcla de CO_2 , N_2 y aditivos como el helio. El fotón que se presente en la salida del haz es dividido aumentando así la energía necesaria para el cambio de estado de las moléculas del nivel superior (23, 25, 26 que son los isótopos radioactivos de las moléculas). Donde el centro activo será el CO_2 con sus moléculas radiantes sobre la transición entre el nivel vibracional que es causa del estado electrónico, con ello, el nitrógeno juega un papel importante en el choque del gas, ya que las moléculas transfieren la resonancia de excitación de energía al CO_2 . La descarga inicial ocurre en el gas N_2 y la excitación de las moléculas de N_2 transfieren la energía a las moléculas de CO_2 en un proceso de coacción.

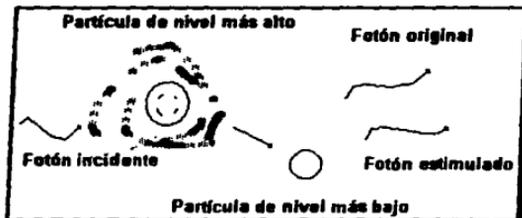


Fig. 3.1. Esquema de la excitación de las moléculas.

En las versiones pasadas de los láseres eran usadas descargas eléctricas entre el $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, lo cual facilitaba la excitación de ambos en su moléculas (23, 25, 26 que son los isótopos radiactivos de las moléculas). Los isótopos son átomos del mismo elemento que tienen las mismas propiedades químicas, pero distintos números de neutrones.

El bióxido de carbono es una molécula triatómica, teniendo tres modos identificables; el modo simétrico figura 3.2 a; el modo de deformación figura 3.2b, y el modo asimétrico figura 3.2c. Los cuales corresponden a las frecuencias vibracionales (w_1, w_2, w_3 , etc.). Donde el estado vibracional de las moléculas de CO_2 se representan por tres números de fotones. Así, la creación del láser de CO_2 esta basada en los niveles correspondientes a los tres modos vibracionales de la molécula de CO_2 que es más bien la primer excitación del nivel vibracional para la molécula de N_2 .

En los niveles más elevados de energía, las moléculas de CO_2 descienden emitiendo una energía de 10.6 y 9.6 μm de longitud de onda. Existe una inversión de la población, puesto que ahora hay partículas en niveles de energía elevados (marcados con 100 y 020) que los que hay en niveles inferiores. Esta proporción es importante porque únicamente las partículas que están en los niveles inferiores contribuyen con los fotones para el sistema. Hay varios niveles de energía del electrón arriba del estado fundamental que la molécula de CO_2 que puede ocupar temporalmente, cuando una molécula de CO_2 desciende desde un nivel de energía que se muestra 001, y cae en un estado intermedio, mostrará una ocupación 100 ó 020. La energía radiante liberada por la transición tiene una longitud de onda 10.6 o de 9.6 μm dependiendo del nivel al que haya descendido. El salto del nivel 001 al nivel 100 es más corto y por tanto su longitud de onda es mayor 10.6 μm (como se muestra en figura 3.2).

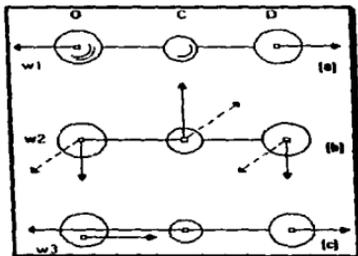


Fig. 3.2. Esquema de los modos vibracionales normales de las moléculas de CO_2 .

En consecuencia, algunas moléculas de N_2 pueden aumentar la cantidad de moléculas de CO_2 en el nivel 001 al transferir energía por resonancia, ya que no hay niveles de energía similares a los dos gases en los niveles inferiores, la población del nivel alto 001 aumenta más que la de los niveles inferiores, obteniéndose así la deseada inversión de población.

El nivel superior es (001), el factor es un nivel de energía que está en función de la frecuencia, y por consiguiente de su longitud de onda, (así como se muestra en la figura 3.3), y el nivel inferior será (020) y (100) en donde la excitación de el nivel (001) toma como resultado el lugar de la coacción inelástica de las moléculas de CO_2 , con electrones que transfieren la energía de resonancia desde la excitación de las moléculas de N_2 a una molécula unexcitada de las moléculas de CO_2 . La emisión de el láser es de $10.6 \mu m$ de longitud de onda que es generada por la transición de (001)->(100), la cual tendrá una transición de (001)->(020) generando una emisión de $9.6 \mu m$ de longitud de onda, donde la relajación del nivel (001)->(100) en su mayor parte toma el lugar de la transferencia de los resultados de la energía de la resonancia a una unexcitación de las moléculas de CO_2 .

Generalmente la emisión de láser CO_2 es de un límite del 20% de consumo de energía, debido a la temperatura generada por el proceso láser. Este aumento de la temperatura se debe al incremento de las moléculas de CO_2 calientes, las cuales causan el bajo nivel de energía que toma lugar en la acción láser resultando una reducción en la potencia de salida; sin embargo, un aumento en la potencia de consumo causa un aumento en la potencia de salida hasta que la temperatura del gas alcance una temperatura máxima y la potencia de salida comienza a disminuir (como se muestra en la figura 3.5).

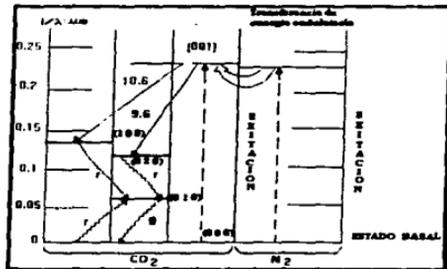


Fig. 3.3. Diagrama de una molécula de CO_2 del nivel simplificado de energía.

No todas las sustancias tienen las propiedades para ser medios emisores láser, puesto que un medio eficaz de emisión láser debe ser suficientemente excitable para alcanzar el estado que se conoce como inversión de población. En esta condición hay una ganancia neta en la luz que se genera, es decir, el medio citado produce más fotones de los que absorbe.

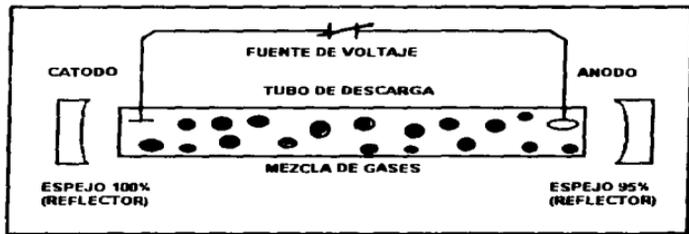


Fig. 3.4. Esquema de la mezcla molecular de gases de un láser.

La excitación comienza con la mezcla de moléculas de nitrógeno (N_2) y se transfieren a las moléculas de CO_2 , donde también se incluye al helio (He) el cual se mezcla con la finalidad de aumentar la conductividad térmica, con ello existe una inversión de la población, ya que ahora hay más partículas en niveles de energía elevados que los que hay en los niveles inferiores. Estas proporciones son importantes porque únicamente las partículas que están en los niveles inferiores son capaces de absorber energía luminosa, y sólo las partículas que están en los niveles superiores contribuyen a proporcionar los fotones al sistema.

3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA LÁSER

Un esquema típico de un sistema de marcado láser se muestra en la fig. 3.5. El principal componente del sistema láser es el suministro de potencia donde se libera del haz del sistema, por medio de la estación de trabajo, con un control por la computadora.

El láser es convertido de energía eléctrica a energía de luz y posee muy poca conversión de eficiencia (típicamente menor que 5%). Así que el resultado es un alto suministro de potencia y de voltaje que es necesario para la corrida del láser.

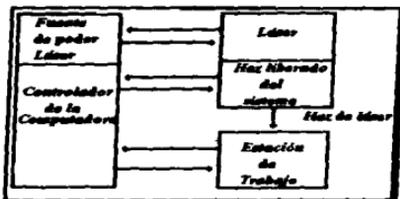


Fig. 3.5. Exploración del tipo de haz liberado por el sistema.

Para evitar el calentamiento de los componentes eléctricos es necesario un sistema refrigerante. El haz que es liberado por la estación de trabajo a través del sistema óptico, directamente focalizado sobre la pieza de trabajo, consiste de un espejo que cambia de dirección al haz, y para proporcionar este sistema la abertura del crecimiento del diámetro del haz. El tipo más flexible de haz liberado del sistema es por medio de un dispositivo explorador, en donde el haz es reflejado en dos ejes de rotación de los espejos montados sobre un motor galvanométrico controlado por computadora.

Entonces el haz pasa a través de una superficie del lente donde el haz se focaliza perpendicularmente al plano del lente, independientemente de la inclinación de el haz, así de entero el haz en lente de manera que el haz tenga un diámetro de 0.12-0.20 mm. El otro tipo de haz liberado por el sistema que es comúnmente usado en el marcado con láser es el de tipo de protección con máscara. Donde el haz de láser es pasado a través de la máscara o plantilla la cual focalizará sobre la parte a marcar. La ventaja de este tipo de sistemas es la velocidad de la masa de producción, ya que la marca puede producir frecuentemente con la individualidad de pequeños pulsos en fracción de segundos. Las desventajas es la necesidad de cambio de máscara y la limitación sobre el diseño que puede ser usado para producir plantillas.

3.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN LÁSER DE ALTA POTENCIA CON LOS MATERIALES

La característica del láser que le permite ser usado en maquinado de metales, es desde luego que es capaz de emitir una alta potencia por unidad de área. Esta potencia nos es tan importante como la capacidad de enfocar a un punto pequeño, produciendo una alta potencia por unidad de área.

Cuando la radiación láser cae sobre un objetivo de una superficie, esta es absorbida y parte es reflejada. La energía que es inicialmente absorbida, es la que calienta al material, por lo cual el material tendrá un proceso de transferencia de calor por conducción y la energía reflejada será emitida por radiación. Existen algunos regímenes que podrían ser considerados, dependiendo de la escala de tiempo y de la potencia del láser por unidad de área. Teniendo como ejemplo, las pérdidas cuando la conductividad térmica es baja, si la duración del pulso es muy corta, pero puede ser importante para cuando los pulsos son grandes.

En la absorción, son importantes los efectos de la radiación en la formación de plasma formado por la vaporización del material sobre la superficie de trabajo. Podemos notar que las pérdidas por la radiación son casi nulas sobre la superficie del material, ya que los efectos por absorción de corrientes de potencia son casi despreciables debido a que el calentamiento ocurre muy rápidamente, de esta manera las propiedades mecánicas del material no se ven afectadas.

La fundición del material por la radiación láser depende del flujo de calor en el material, este flujo de calor depende de la conductividad térmica (K). Pero la conductividad térmica no es el único factor que influye en el cambio de temperatura, sino que también depende del calor específico ρc del material. En donde el grado de calentamiento (ρc) es inversamente proporcional al calor específico por unidad de volumen, o sea la densidad del material.

El factor para el flujo de calor es;

$$K/\rho c$$

Donde: K = conductividad térmica
 ρ = Densidad del material
 c = Calor específico
 t = tiempo

Este factor tiene dimensiones de cm^2/s , con características de un coeficiente de difusión dándose el término de difusividad térmica, el significado de este término es el que determina con cuanta rapidez un material aceptará y conducirá energía térmica.

Así, para la fundición del material la alta difusividad térmica normalmente permite gran penetración, sin choques o grietas térmicas. La difusividad térmica de las aleaciones es generalmente más baja que la de los metales puros. Los aceros para herramienta y algunas aleaciones de níquel tienen valores bajos. Un valor bajo de difusividad térmica limita la penetración de calor y puede reducir la capacidad de fusión durante el proceso del láser. El ancho de penetración de calor en un tiempo (t) está dado por la ecuación:

$$D=(4Kt)^{1/2}$$

Donde D es el espesor de penetración del calor y K es la conductividad térmica, estas ideas nos llevan al concepto de una constante de tiempo térmico para una placa de metal de espesor X . La constante de tiempo térmica es igual a $(X^2/4K)$, esta constante representa la duración de pulsos requerida para dar una aproximación específica de penetración.

Las propiedades de los materiales juega un papel importante al evaluar la posibilidad de procesar una pieza, ya que determinan si el láser será reflejado, absorbido y/o transmitido de acuerdo a los puntos siguientes:

1) La incidencia del haz y su transferencia de energía al material, debemos considerar que sólo una parte de la energía incidente se transmite al interior, ya que parte esta es reflejada por la superficie.

2) La luz es absorbida por el material, donde las características superficiales de este son la reflectividad de la superficie a una longitud de onda en particular, considerando el coeficiente de absorción del material.

3) Es necesario que el haz láser sea preciso ya que la potencia transmitida será absorbida por el mismo, para el aumento de la temperatura. Algunos materiales reflejan una gran cantidad de luz de regreso a la cavidad del láser, incrementando la potencia.

- El incremento de la potencia depende de la reflectividad de la pieza de trabajo.
- El incremento de potencia conduce a operación de proceso no homogéneos.
- La rugosidad disminuye con el incremento de potencia.
- Cuando el punto focal está debajo de la superficie del material, el incremento de potencia es mayor.

4) Las propiedades relacionadas con la cantidad de energía requerida para provocar un cambio de fase deseado, como fusión o vaporización, incluyen a la densidad, calor específico, y calores latentes.

5) Las propiedades que afectan el flujo de calor en el material involucran a la conductividad térmica y a la difusividad. Un material con alta difusividad térmica aceptará y conducirá energía térmica muy rápido.

3.3.1 Características que deben presentar los materiales

Los materiales que absorben una luz muy intensa se ven afectados por lo que es la reflectividad de la superficie que particularmente dependerá de la longitud de onda de la luz. Los materiales con muy buena conductividad térmica como son el oro, plata, cobre, y el aluminio. Son materiales de baja absorción de luz, por lo que no puede ser adecuados para el marcado con láser, sin embargo, los plásticos, y la madera son bajos en conductividad térmica, por lo que son altamente absorbentes de energía en forma de luz. Casi todos los metales (80%) son buenos reflectores relativamente de una longitud de onda de $10.6 \mu\text{m}$ de energía del lugar donde eleva la temperatura. La reflectividad también se ve afectada en el acabado del material, en el caso excepcional de un buen reflector es el aluminio y el cobre, estos no pueden absorber la energía necesaria o suficiente para que la vaporización o fundición no pueda ser pareja. La conductividad térmica de los metales en estado de láminas puede ser considerada como un factor importante, ya que al laminar dos materiales al mismo tiempo tendrán dos fases de mezcla. Aprovechando así, las características de algunos materiales en combinación, de estos se puede aprovechar la absorción por ejemplo de los aceros inoxidable sobre el oro, cobre, plata, y aluminio, se puede aprovechar la absorción de las dos fases de la mezcla de las láminas de metal, la cual tendrá una mayor vaporización y un aumento de energía que puede ser hasta del 50%.

Los materiales para ingeniería podrán ser comúnmente usados en la industria, y pueden ser divididos en cuatro grandes grupos: metales, cerámicos, polímeros, y compuestos (como se muestra en la figura 3.6). Un ejemplo de estos son: aceros, caucho, madera, papel, vidrio, etc. La selección de cual de los procesos de manufactura puede ser aplicado a los materiales en particular esta determinado por una serie de factores como son: La geometría del material, ya que algunos procesos pueden caracterizar por su grado dimensional de libertad tales como el taladrado, corte dimensional, y torneado. El volumen de producción, depende de la flexibilidad del equipo y de las dimensiones del material. En el caso particular del sistema láser utilizado, una de las características más importantes es la longitud de onda que emite, ya que de esto depende la absorción de los materiales. Por ejemplo para los polímeros con este tipo de onda tiene una gran absorción que no pasa con algunos de los metales y cerámicos.

Para que el material pueda ser tratado mediante el haz láser es conveniente que la potencia transmitida sea absorbida por el mismo material, dando lugar al aumento de temperatura, por lo que el coeficiente de acoplamiento de un material es un factor que también depende de su conductividad térmica y difusividad. Así, los rangos de trabajo para los polímeros (algunos de estos son mencionados en la fig. 3.6) son muy grandes, al contrario de algunos metales y cerámicos donde sus rangos son reducidos y por lo tanto críticos de trabajarse.

La selección de cual es el proceso de manufactura aplicable al material queda influenciado por los siguientes factores:

- La geometría de la parte
- Los volúmenes de producción
- Las propiedades físicas del material
- Cantidad de material

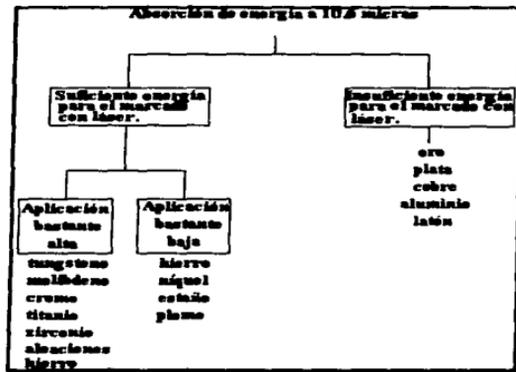


Fig. 3.6. Metales óptimos para el láser con CO₂

Cuando el material se remueve durante el procesamiento con láser, éste se funde por vaporización de la pieza de trabajo, lográndose un corte cuando la penetración es completa (como se muestra en la fig. 3.7b), pero si el haz penetra parcialmente en la pieza de trabajo se creará así una marca (como se muestra en la figura 3.7a).

En las actuales aplicaciones del maquinado láser, es común poner a evaluar los parámetros de operación con el propósito de aceptar la velocidad del maquinado y cantidad de corte deseado, con ello se crea una iteración de prueba y error, la que muchas veces se ve involucrado el consumo de tiempo.

Las altas temperaturas, la intensidad de energía y el flujo de calor, es la posible causa de formación de plasma y variación de emisividad de la superficie de la erosión frontal combinada con una marca de un medio ambiente hostil para la medida del fotón emitido.

Los parámetros de un haz láser durante el proceso de marcado que son importantes son el diámetro, la potencia y la velocidad, ya que con ello se determinará la penetración desde la superficie del material.

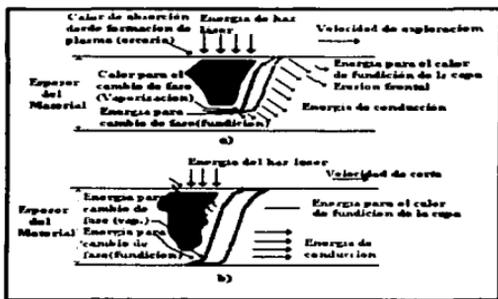


Fig. 3.7. Mecanismos de transferencia de calor.

a) una marca, b) corte

3.4 TIPOS DE LÁSERES PARA MARCADO

Son de dos tipos sea con láser Nd: YAG ó con CO₂. Las características normales del sistema de marcado con láser de Nd-YAG son las de una potencia promedio máxima de 50-100 Watts mientras que para los sistemas láser de CO₂ la potencia depende de la frecuencia de su pulso ya que la potencia pico del pulso individual puede no exceder a una potencia promedio máxima del láser, de aquí que relativamente pocos láseres de CO₂ disponibles pueden aumentar su capacidad de pulsos, donde la potencia pico del pulso individual es significativamente alta en comparación con la potencia promedio. En la elección del láser para el marcado además de los parámetros considerados se deberán de tomar en cuenta tanto la longitud de onda del haz como el ancho del pulso.

Se ha conseguido obtener marcas sobre distintos sustratos empleando láseres cuya longitud de onda varía desde el infrarrojo hasta el visible e incluso el ultravioleta. Como en cualquier otro tipo de proceso láser, los factores determinantes son la absorción y reflexión que presenta el material frente a una longitud de onda dada. Los materiales totalmente reflectantes o transparentes a una radiación no podrán ser marcados porque no absorberá ningún tipo de energía. Cuando esta absorción se realiza en profundidad se producirá una marca, pero las mejores condiciones serán aquellas en las que la absorción de la radiación se lleve a cabo de forma superficial.

Aunque también los láseres se pueden manejar de modo continuo, el modo más adecuado es en forma pulsada, ya que es el sistema más ampliamente usado. El efecto obtenido sobre el material depende de la duración del pulso ya que influye directamente en la densidad de potencia del pico. Este ancho de pulso puede variar desde nanosegundos hasta alcanzar casi el modo continuo.

Los láseres de CO₂ -TEA (Es un láser atmosférico de CO₂ excitado transversalmente) operan en pulsos discretos de elevada energía. Los láseres de CO₂ de tipo TEA generan un pulso de elevada potencia del orden de uno a diez megavatios, que vaporiza la superficie de la mayoría de los materiales no metálicos, propiedad que se aprovecha para el proceso de marcado. La corta duración de este tipo de pulso es típicamente inferior a un microsegundo, lo que no permite crear una marca borrosa.

En cuanto al marcado con láser de CO₂ de modo continuo, este método realiza el marcado por desplazamiento del haz láser focalizado sobre la pieza de trabajo, donde la fuente láser emite un haz de forma continua incorporándose a un conjunto de espejos deflectores controlados electrónicamente por un sistema de baja inercia (scanner). Esto permite posicionar el haz con elevada precisión y velocidad, permitiendo abarcar zonas efectivas de marcado de 180°180 mm para un sistema de dos ejes, y de hasta 320°320 mm en el caso de emplear tres ejes. La principal característica de este método reside en el bajo costo del equipo, pues incorpora un láser de baja potencia. Son suficientes entre 5 y 30 Watts para conseguir una marca, teniendo por esto un bajo costo de mantenimiento y de combustible.

Dentro de estos sistemas se diferencian dos modelos: estático y dinámico, en función de la velocidad relativa que presenten la superficie a marcar respecto al conjunto óptico de deflexión. El sistema denominado estático se caracteriza por que la pieza aparece sin movimiento durante la impresión de la marca con relación al movimiento del haz. Esto permite grabar entre 20 y 40 caracteres por segundo, valor que depende del material y la calidad deseada y seguido. En el dinámico se permite que durante el marcado del producto se desplace con respecto a la óptica con una velocidad constante no superior a los 35 metros por minuto.

Los materiales tales como papel, cartón, vidrio, piel, cuero, madera, corcho, etc. Además de una amplia gama de plásticos se muestran a continuación:.

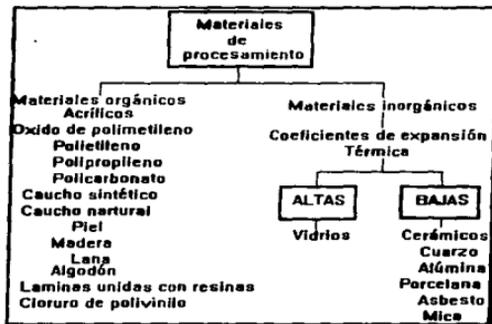


Fig. 3.8. Materiales para el marcado con láser.

Cuando un rango láser de CO₂ toca la superficie de un material, una parte del rayo se absorbe, la que depende de la capacidad de cada material para absorberlo, el cual es inversamente proporcional a su conductividad, así los materiales como el oro, cobre y aluminio son pobres absorbedores, en tanto que los plásticos son absorbedores casi perfectos. En cuanto a la reflectividad, se ha encontrado que, cuando se introduce oxígeno en el área en la cual el rayo toca a la pieza, el marcado o corte mejora, esto se debe a que el chorro de oxígeno cumple con formar una atmósfera que reduce la reflectividad, de tal manera que la absorción del rayo tenga un lugar más eficiente. Las grabaciones obtenidas son imborrables, permaneciendo la marca inalterable, sea cual sea el proceso que se realice después, siempre que no se destruya el producto o el lugar donde se encuentre dicha marca. Además, las superficies a grabar no precisan estar limpias, no influyendo en la calidad. El límite superior de la eficiencia de el láser CO₂ es de 38%, la cual representa la eficiencia del quantum, que es la energía particular de 10.6 μm del fotón presente en la salida donde el haz es dividido, para aumentar la energía necesaria a causa del estado del nivel superior de la molécula. El medio activo de la mezcla del bióxido de carbono, nitrógeno, y varios aditivos semejantes al He y H₂O, etc.

Retomando las características del marcado con láser de Nd:YAG, este proceso permite que el marcado de superficies metálicas, trabaje con potencias del orden de 60 Watts en continuo, debido al mayor coeficiente de absorción que presentan los materiales a la radiación de $1.06 \mu\text{m}$. Si se requiere marcar con potencias mucho más elevadas, por presentar una menor absorción frente a la radiación de $10.6 \mu\text{m}$, en el proceso de marcado, se necesita el movimiento relativo entre el haz y la pieza. Unos ejes de coordenadas pueden mover la pieza bajo el haz estático o desplazar el haz sobre la superficie a grabar. El manipulado del haz se suele realizar también por medio de espejos deflectores, controlados galvanométricamente, que lo dirige una vez focalizado sobre una pieza estacionaria.

El haz es reflejado en el sentido del eje X por un espejo y luego en sentido del eje Y por el otro espejo. Los láseres de Nd:YAG pueden trabajar en modo continuo o pulsado según su diseño, siendo los pulsados los más utilizados industrialmente, con una duración de pulso de 10^{-6} segundos. Las marcas que se producen de modo análogo a las originadas por un láser de CO_2 , tienen una absorción de la radiación mayor a causa de un incremento en la temperatura de la zona de contacto, durante un intervalo de tiempo inferior a un microsegundo. Esto no permite que el calor se transmita por debajo del punto focal, limitando la zona afectada térmicamente. La marca aparecerá por eliminación de material, lo que corresponderá a un grabado, o a la aparición de un color de contraste. Por ejemplo, al marcar un material con recubrimiento, como puede ser una placa metálica con una capa de pintura, el haz incidente produce la eliminación de dicha capa, dejando al descubierto al material base. Una técnica usual de marcado es la que se realiza por matriz de puntos, esta emplea un láser de Nd:YAG pulsado unido a un sistema de scanner que realiza un barrido de líneas horizontales consecutivas. La velocidad de pulso es bastante lenta del orden de 100 pulsos por segundo, con ello se realiza un marcado de líneas punteadas, originadas por las zonas de material evaporadas por cada pulso. La generación de un código o una secuencia alfanumérica no es por marcado de un carácter después de otro, sino que el total del mensaje se va marcando en líneas sucesivas, respondiendo la calidad obtenida al número de puntos por línea y carácter que se utilice. Puede marcarse también por el sistema de líneas continuas, carácter tras carácter. En este caso se utilizan láseres de Nd:YAG del tipo Q-switch, que en contraposición a los anteriores trabajan a una velocidad del orden de 1000 pulsos por segundo. Esto provoca que a pesar de operar en modo pulsado el efecto sea una línea continua ya que dichos pulsos se solapan al ser mucho más rápidos que el movimiento de desplazamiento.

3.5 MÉTODOS DE MARCADO LÁSER

El marcado con láser tiene una extensa aplicación en cualquier proceso de manufactura con láser, desde entonces es que el proceso es controlado por computadora haciendo al proceso extremadamente flexible. Donde podemos obtener diseños complejos y de gran precisión, los cuales se pueden modificar con la ayuda de la computadora, como también se pueden realizar cambios de profundidad y color cambiando los parámetros del proceso. Así podremos obtener líneas de un ancho variable de aproximadamente 0.125 mm, con otros dispositivos ópticos, se puede alcanzar anchos de línea de hasta 0.08 mm. Cuando el sistema de elección sea un equipo láser, la pregunta será si es la mejor opción y que método de marcado es el más conveniente a usar, el método de **máscara**, **matriz de punto**, **grabado** o por **scanner**. Cada tipo de marcado tiene sus ventajas y limitaciones.

3.5.1 Marcado con imagen de máscara

El método de máscara es similar al de un proyector de diapositivas. Una fuente intensa de luz, en este caso el láser, ilumina una plantilla metálica, la cual es proyectada con un lente sobre la superficie que va ser marcada. La máscara es iluminada por un pulso de elevada intensidad en el que el diámetro del haz láser es lo suficientemente ancho para cubrir toda el área de la máscara. Para cubrir áreas mayores o mensajes largos se necesita una sucesión de pulsos, cubriendo cada uno de ellos una porción de la plantilla. Es necesario que la plantilla no esté en contacto con la superficie a marcar, ya que esto permite trabajar a distancias de hasta treinta centímetros entre la fuente de haz láser y la superficie.

El marcado con imagen de máscara con un láser TEA de CO₂ es generalmente incluido en un sólo sitio junto con un tubo de entrega del haz láser y el sujetador de la máscara y luego el lente para el artículo que será marcado, no existen piezas móviles en el sistema láser para que la rapidez de repetición de pulsos sea alta, de modo que lograr un empleo máximo del material o los empaques es necesario proyectar el láser eficientemente.

La creación de una marca se realiza mediante el método de **máscara**, por medio de una placa templada con la figura correspondiente a proyectar. Este sistema se utiliza en industrias diversas: electrónica, farmacéutica, cosmética y alimentación, en donde se utilizan para marcar códigos de fabricación, fechas de caducidad o cualquier otro tipo de información. El marcado láser produce un haz con una emisión en una área a través de una plantilla para realizar una marca. Para después la emisión del haz sea enfocado hacia la pieza de trabajo a través de un lente (como se muestra en la fig. 3.9).

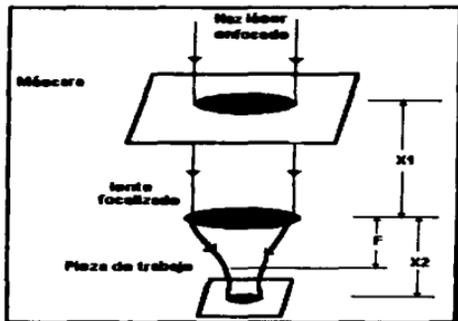


Fig. 3.9. Configuración del sistema de máscara para marcado con láser

El haz transmitido a través de la máscara es focalizado por un lente simple sobre la superficie de la pieza, variando la distancia entre la máscara, la lente y la superficie de la pieza de trabajo a marcar, pueden modificarse a voluntad del tamaño de la imagen y, por tanto, el de la marca, siempre que se mantenga la relación:

$$1/X_1 + 1/X_2 = 1/F$$

y también

$$D = X_2/X_1$$

donde X_1 y X_2 son las distancias de la máscara a la lente y de la lente a la pieza de trabajo, respectivamente; F es la longitud focal de la lente y D el aumento de tamaño de la imagen en la pieza de trabajo con respecto a la máscara. Siempre que la densidad de potencia emitida por el láser sea suficiente y que la pieza presente la absorción adecuada a la radiación incidente, la imagen de la máscara quedará impresa en la superficie de la pieza. Pero para valores más grandes que $2F$ sobre la pieza de trabajo la imagen podrá ser invertida y demagnificada con un factor demagnificación $D=(X_2/X_1)$. La densidad de energía de la emisión láser en la pieza de trabajo es proporcional al cuadrado de la demagnificación.

Sin embargo, la densidad de energía disminuye con el cuadrado de la distancia, pudiendo llegar a la situación en que la energía que incide en el plano no sea la suficiente para realizar la marca (como se muestra en la figura 3.10).

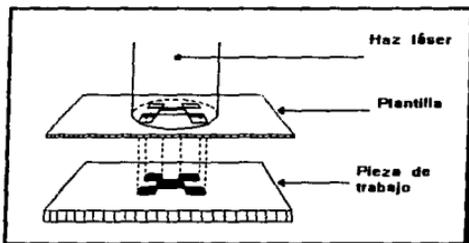


Fig. 3.10. Proyección de una máscara en el marcado con láser.

Es importante destacar que la energía que no se transmite a través de la máscara, pueda incidir sobre la superficie metálica, para después ser reflejada hacia la lente, y pueda dañarse, pudiendo llegar a cualquier punto del sistema óptico o del cabezal del láser y dañar algún otro componente, por tanto es conveniente proteger esta zona. Una forma simple de protección consiste en colocar la máscara inclinada de 5 a 10 grados de modo que al realizarse el marcado de las piezas a una velocidad muy alta, por lo que el proceso se vuelve dinámico. Debido a la corta duración del pulso, siendo siempre muy inferior a la velocidad mecánica de desplazamiento de cualquier tipo de cadena de fabricación, el movimiento de los objetos aparece detenido, es decir, durante el marcado se comporta como si estuviera sin movimiento con respecto al haz. Esto hace que la calidad obtenida sea excelente, sin que se observe ningún tipo de distorsión o de estelas en el marcado. El resultado es permanente, un marcado indeleble, pero debido a que el total de energía láser es esparcida sobre la superficie total de marcado, la densidad de energía es baja de modo que sólo marcará materiales con altos coeficientes de absorción y bajos puntos de fusión tales como los plásticos, maderas, pinturas y papel.

La ventaja más significativa de este proceso es que el pulso del láser sólo dura unas cuantas millonésima de segundo y efectivamente "congela" el movimiento del objeto móvil. En la práctica esto significa que se pueden marcar una gran cantidad de artículos en una banda transportadora sin detenimiento. Se pueden alcanzar velocidades de varios metros por segundo.

Hasta diez pulsos por segundo son factibles, pero la rapidez se encuentra usualmente restringida a un número menor por la velocidad a la cual el producto puede ser transportado. La altura mínima del carácter es de aproximadamente 0.5 mm y el máximo es determinado por el área total de marcado, la cual puede variar de 30 a 100 mm² de acuerdo a la potencia del láser y al material empleado. Manufacturar una máscara nueva para cada fecha diferente o cada serie de número resulta costoso, pero los fabricantes de estos sistemas actualmente proporcionan un sistema de máscara en el cual se pueden alterar los caracteres al rotarlos en una serie de discos concéntricos con una serie de números y letras o bien intercambiando los discos.

3.5.2 Proceso de barrido o scanner

Este método de **scanner** es simplemente un barrido en línea que incluye una focalización y un sistema óptico, el cual puede ser usado para la focalización de la pieza de trabajo. Al mismo tiempo, el láser puede repetir su pulso a una frecuencia muy superior al desplazamiento de la cadena, pudiendo acoplarse a cualquier velocidad de producción. En este método el marcado se realiza por barrido o **scanner** en el cual el haz puede ser más preciso posicionándolo en relación a los ejes coordenados X-Y, para que el haz sea exactamente focalizado.

Sistema de grabado: el láser Nd:YAG es montado con el sistema de deflexión galvanométrico para constituir el cabezal de escritura. Toda la electrónica requerida para operar el sistema se monta usualmente por separado con conexiones de agua y electricidad en un conducto "umbilical". Este arreglo permite que el cabezal de escritura sea montado en cualquier posición conveniente de acuerdo al sistema de manejo de materiales, de modo que puede ser montado sobre una banda transportadora o bien sobre una mesa de coordenadas en caso que se requiera marcar grandes extensiones de material. Los láseres Nd:YAG sólo requieren de agua de enfriamiento y de suministro de energía trifásica. El principal consumible es la lámpara de arco de kriptón empleada para generar la potencia de salida del haz y los sistemas de espejos galvanométricos con el haz focalizado (**scanner**) son mucho más flexibles, ya que estos espejos son controlados por computadora y los mensajes pueden ser cambiados entre marca y marca sin que esto afecte la velocidad de proceso global. Además, pueden combinarse fácilmente tamaños, orientaciones y rotaciones incluyendo diferentes gráficos de trabajo. Atendiendo el tipo de material, cuando se trate de sustratos orgánicos podrá elegirse cualquiera de los dos modelos, pero en marcado de superficies metálicas no pueden emplearse el sistema de máscara, por la reflexión es tan alta que el haz puede regresar al sistema óptico y producir daños. Del mismo modo, los sistemas scanner que incorporen un láser Nd:YAG serán aconsejables para el tratamiento de metales mejor que para plásticos o materiales orgánicos.

El marcado con láser es un proceso de no contacto y, por lo tanto, no puede tener ninguna distorsión de partes delicadas, lo que quiere decir que no habrá ninguna fuerza aplicada a las partes del proceso. En muchos de los elementos manufacturados que deban de ser inscritos con un nombre, número, o algún otro tipo de código alfanumérico, el marcado con láser ha mostrado ser rápido, eficiente, y tiene una dirección efectiva de inscripción en los productos.

La conductividad térmica durante el pulso es despreciable, de modo que la densidad de energía absorbida permanece localizada, produciendo el calentamiento de una capa fina de la superficie hasta causar la eliminación por vaporización de dicho material. El aspecto de la marca vendrá determinado, además, por el tipo de acabado del material. Cuando se trate de sustratos sin recubrimientos, la marca responderá a alguno de los tres efectos citados anteriormente: fusión, vaporización, o reacción. Por el contrario, la eliminación de recubrimiento puede dar lugar a marcas por contraste al hacer visible la capa inmediata inferior, como ocurre en las superficies tratadas con una película de tinta o pintura.

Uno de los principales problemas con los primeros sistemas láser era la dificultad física de mover el haz láser por la superficie lo suficientemente rápido para aprovechar la potencia láser disponible. Una forma particular de lograr esto es envolver al material de trabajo, por ejemplo una hoja de hule, al rededor de un cilindro en rotación y un haz láser (generalmente de CO_2) enfocado sobre la superficie. El foco del láser es entonces trasladado a lo largo de la superficie generando una serie de líneas helicoidales traslapadas, el láser es encendido y apagado al hacer el barrido de un diseño envuelto alrededor de otra sección del cilindro con un láser de baja intensidad y una fotocelda acoplada al láser de corte. Se genera entonces un patrón en la hoja de hule la cual puede ser usada para imprimir papel tapiz, posters y productos similares. Generalmente se emplean los láser de CO_2 para el proceso de barrido donde las altas velocidades son posibles empleando puntos focales relativamente grandes y por lo tanto bajas densidades de energía para grabar materiales orgánicos como madera, hule y plásticos. El proceso es relativamente deficiente cuando se tiene que cubrir toda una superficie, de modo que es mejor emplearlo cuando se requiera eliminar grandes extensiones de material. Además de papel tapiz y otros tipos de impresión existen otras aplicaciones principales como los acabados decorativos en madera y plástico, placas de presentación y artículos similares.

3.5.3 Marcado con matriz de puntos

Cuando se emplean láseres para producir marcados por "escritura", en lugar de emplear un pulso instantáneo (como se muestra en el método anterior) se requiere producir una serie de puntos separados tal como en una matriz de 7x9 puntos.

En ocasiones se emplean láseres de potencia elevada con los cuales se pueden obtener marcas muy profundas, aunque la legibilidad de las marcas es deficiente y sólo se pueden realizar un número limitado de diferentes caracteres (trabaja como un plotter o una impresora de puntos).

La fuente es generalmente un láser pulsado Nd:YAG el cual puede proporcionar una potencia media de varios cientos de Watts y pulsos con duración de hasta 300 Hz., como se describe en la siguiente sección (el funcionamiento de un plotter). Este tipo de marcado puede ser empleado cuando se requieren marcas muy profundas.

3.5.4 Grabado láser

Cuando la salida enfocada de un láser Nd:YAG pulsado a varios Khz es llevado sobre la superficie de un metal se realiza una línea continua de ignición fundición o corte. La potencia y frecuencia disponibles son lo suficientemente elevadas para poder alcanzar velocidades de escritura de 24000 mm/min o superiores (dependiendo del material), para lo cual se emplean sistemas de deflexión galvano-óptica. El haz láser se expande generalmente de manera óptica a aproximadamente 15 mm antes de ser refractado por un espejo accionado por un galvanómetro y luego por otro que permite que el haz se mueva en dos direcciones, sólo después de la deflexión el láser es enfocado por una lente de gran diámetro el cual no sólo produce el punto focal sino también aplanar el campo curvado generado por los espejos en movimiento. El sistema mecánico empleado para mover el haz puede ser cualquier conjunto óptico incorporado a unos ejes de coordenadas X-Y, controlado por un sistema de control numérico, o bien por medio de espejos controlados galvanométricamente (como se muestra en la fig. 3.11). Es un esquema típico de un sistema de marcado con láser. El principal componente del sistema de láser, es donde se encuentra el suministro de potencia ya que el haz se libera del sistema hacia la estación de trabajo.

El área máxima de escritura está definida por el área máxima de imagen con calidad aceptable que es aproximadamente de 80 a 100 mm². La inercia extremadamente reducida de los espejos galvo-ópticos permite velocidades puntuales de hasta 2 m/s entre caracteres, sin embargo la escritura se encuentra limitada por la energía disponible (hasta 60 Watts pulsados) y la cantidad de material eliminado que produzca la marca visible. Para poder alcanzar velocidades de hasta 24000 mm/min se emplean sistemas microprocesadores de alta velocidad para poder calcular la cantidad de datos requeridos y con ello ahora es posible generar cualquier forma bidimensional con un simple programa de computadora. Para este tipo de marcado se utilizan casi invariablemente láseres Nd:YAG.

La principal limitación es que la mayoría de los materiales transparentes al espectro visible son también transparentes para la longitud de onda de este tipo de láser, de modo que no es posible marcar vidrio, perspex y algunos plásticos blancos, por lo que se ha introducido un sistema de grabado láser de CO₂ especialmente para este tipo de materiales.

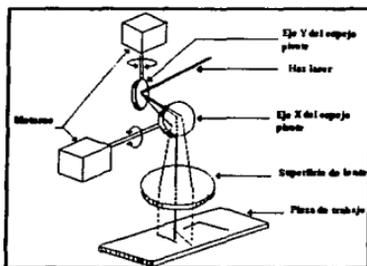


Fig. 3.11. Esquema del sistema de marcado galvo-óptico.

3.6 CARACTERÍSTICAS DEL MARCADO CON LÁSER

3.6.1 Tamaño de letras

La extensión de la superficie que define el área de escritura y el tamaño de la letra es necesario hacer una distinción entre el proceso de imagen de máscara y el grabado láser. En el primero el área de escritura está determinada por la potencia de salida del láser, la sección transversal del haz y las propiedades del material a ser marcado. Por ejemplo, un láser pulsado de CO₂ con energía de 1 joule (1 Watt por segundo) marcará vidrio y componentes electrónicos sobre una área de 10 mm² para un papel blanco puede ser marcado en una área de 100 mm². Con altas energías (por ejemplo 10 joule) se pueden marcar área proporcionalmente mayores.

Para el caso del grabado con láser el área no está determinada por la potencia de salida del láser, sino por la geometría del espejo galvanométrico del deflector del haz y el lente de enfoque empleado. Comúnmente se pueden generar áreas de hasta 100 mm² con el tamaño máximo de letra de acuerdo al área de escritura y el tamaño menor de aproximadamente 0.10 mm de altura. Si se requiere una área mayor de escritura entonces se puede combinar el sistema de espejos galvanométricos con una mesa de coordenadas X-Y para marcar productos de hasta 2 m de largo.

3.6.2 Ancho de línea

Con el marcado de imagen el ancho de línea se encuentra esencialmente determinado por la forma de la máscara, y de el haz producido por la lente, la cual puede ser menor a μm . Para el caso del grabado el ancho de línea está determinado por el enfoque del haz láser. Con este método se pueden producir líneas de entre 20 μm y 100 μm de ancho con un ajuste correcto para líneas de mayor amplitud se emplea la llamada "escritura amplia", la cual involucra los espejos con galvanómetros los cuales permiten un movimiento oscilatorio adicional durante la escritura. El ancho de línea puede, para todo propósito práctico, ser ajustado a placer y la experiencia indica que la "escritura amplia" a menudo mejora la legibilidad y reduce la formación de valles.

La amplitud de línea puede ser variado por control computarizado durante el proceso de escritura, de modo que se pueden probar varios espesores dentro de una sola pieza escrita. La amplitud puede posteriormente ser modificada con los programas disponibles, por ejemplo, la escritura múltiple puede efectuarse en el mismo punto o puede repetirse con una simple tecla. Si se emplea líneas muy delgadas y se programan las letras de menor tamaño es posible generar una escritura que se pueda leer sólo con un microscopio.

3.6.3 Profundidad de la escritura

La profundidad depende esencialmente del tipo de proceso de escritura. Por el marcado de imagen de máscara se tiene sólo una pequeña pérdida de material involucrado, el cual se encuentran en el rango de 1 a 10 μm . Generalmente se determina porque tan profundo se puede vaporizar un estrato del material, por ejemplo, por el espesor de la pintura o del estrato del óxido. Con el grabado láser se pueden lograr mayores profundidades de penetración del material. De acuerdo a la potencia empleada, el mismo láser puede producir líneas continuas de fundición o una profundidad de penetración desde unas cuantas μm hasta varios cientos de μm . Con un refriamiento especial de este proceso es posible lograr mayores penetraciones.

Se puede obtener un mejoramiento en el efecto de penetración en el material si se suministran gases como oxígeno o aire comprimido. El aire comprimido puede utilizarse para realizar una mayor extracción del material. Añadiendo aditivos que oscurecen el grabado creando un efecto de mayor penetración y por lo tanto logrando un grabado de mayor legibilidad. La profundidad del grabado es definido por los límites de volúmenes de material removido, y la velocidad de avance, definido por la rapidez de remoción del volumen de material.

3.7 APLICACIONES DEL MARCADO LÁSER.

Las aplicaciones del marcado con láser no tiene límites, de cualquier modo algunos materiales no son marcables con láser, y en algunos casos, el color de la textura del marcado produce un láser no deseable para la aplicación. La flexibilidad, y el bajo costo son propiedades únicas de marcado láser que pueden ser utilizadas con una ancha variedad de ventajas en la decoración y aplicación de marcado industrial. Una de las aplicaciones más comunes es el marcado de pluma para decoración, el nombre de empresas, logos, códigos alfanuméricos, símbolos, gráficas, y personalización del grabado láser. En más casos, el láser es usado para crear grabado en capas de pinturas acrílicas y en resinas epóxicas, expuestas a una pluma de un cuerpo de latón, otro tipo de decorado tiene un rango de aplicación en el marcado sobre las joyas.

Los materiales plásticos reaccionan diferente a la luz de distintas longitud de onda y, por tanto, a diferentes láseres. La cantidad de luz absorbida obstruida es reflejada, y transmitida a través de varios materiales. Donde la fracción de energía de luz desde el láser se parte al ser usada como calor en el material. El calor producido en el material es la causa de que el material se derrite por vaporización, y cambio de estructura, y la reacción con otros materiales plásticos que pueden ser una mezcla de enlace y cambio de color y volumen.

En la figura siguiente se muestran 5 tipos de marcas que pueden ser producidas por el láser, dependiendo sobre todo del material y si la reacción por radiación del láser tiene una longitud de onda específica, como de energía. En la fig. 3.12a. se representa un grabado con láser obtenido cuando el material es vaporizado sin escurrimiento significativo, sin tener una degradación térmica, y obteniendo así el color original de una marca. En general, el material debe tener alta absorción, baja conductividad térmica, donde este tipo de marcas es usual en la generación con pulsos del láser. En la fig. 3.12b. se representa el caso de marcado mediante evaporización de una parte mientras que en la otra se presenta una transformación isotérmica conocida como zona afectada por el calor. El resultado es una marca grabada, que es de diferente color que el volumen de material. La fig. 3.12c. se representa el marcado de el material con transformación térmica sin creación de vaporización. Algunos plásticos actuales aumentan el volumen a elevadas temperaturas, por lo que, el volumen del material producido de diferentes colores puede realizar un grabado en relieve. En la fig. 3.12d, e. muestra el efecto de las láminas de plástico, respectivamente. Plásticos/ láminas de metal incluidas en pinturas de polímeros que cubren el metal, entonces los metales son los mayores reflectores de la radiación del láser, resistentes a una alta energía de luz que las capas de plástico no pueden resistir y son removidas con el láser sin afectar significativamente el sustrato del metal.

En casos de grabado en plásticos/ láminas de plástico continuas, la capa alta puede ser penetrada en disposición a una expuesta fundamentalmente de la capa.

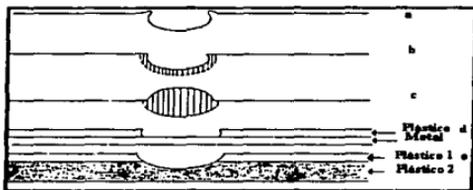


Fig. 3.12. Muestra las diferentes secciones de los tipos de marcas de láser sobre plásticos.

La más común de las aplicaciones del marcado industrial se encuentra en la parte de números de series, nombre de empresas, y logos de las empresas para la identificación de partes. Puede usarse marcado láser para códigos de barras, para caracteres alfanuméricos, y esquemas funcionales. El marcado con láser sobre metales ha mostrado ser un medio rentablemente viable para algunos aplicaciones en la ingeniería como son la identificación de partes en la industria. Otras de las aplicaciones para el marcado son microcanales de un sistema de enfriamiento y la creación de aberturas para el ensamble de piezas, como también en el marcado de la información legal semejante a la manufacturación y expiración de datos. En la industria de la destilería se aplica el láser para la realización del código de barras de seguridad sobre las botellas, pero no son los únicos también en la industria alimenticia.

Ejemplos de aplicación de marcado con imagen de máscara:

- Numeración de códigos de empaques plásticos de circuitos integrados
- Numeración de códigos de capacitores (sin casco metálico)
- Marcado de cables eléctricos a alta velocidad
- Numeración de códigos en lentes de vidrio
- Escritura en empaques de alimentos de la fecha de caducidad
- Escritura en perspex y PVC

Ejemplos de aplicación del grabado láser:

- Obleas de silicón
- Etiquetas y componentes de aluminio anodizado

- Etiquetas y componentes de acero inoxidable
- Marcado en vidrio y plásticos transparentes
- Alabes de turbina(con aleación de alto punto de fusión sin microfractura)
- Componentes aeroespaciales (aluminio, acero inoxidable, titanio, etc.)
- Datos de tolerancias en pistones para la industria automotriz
- Medidores, vernier, reglas, escuadras, rodillos de combustible y casco de grafito para industria nuclear
- Marcado de herramientas, incluyendo metales duros
- Instrumentos quirúrgicos de implantes

3.8 VENTAJAS DEL MARCADO CON LÁSER

- No existe contacto con el material
- No hay desgaste de herramientas y riesgo mínimo de microfisura
- No es necesario ejercer presiones que puedan deformar al material
- Ahorro considerable de tiempo en comparación con otros métodos convencionales
- Los textos del marcado pueden ser almacenados indefinidamente
- Las piezas pueden ser marcadas en la línea de producción
- Se pueden marcar superficie que por otro método sería imposible
- Se tiene una excelente estandarización del proceso
- Alta velocidad de procesamiento, hasta 10 Hz o 50 caracteres por segundo
- Mejoran la calidad del producto por ausencia de esfuerzos o microfisuras como en el caso del grabado y estampado convencionales
- Se tiene un mínimo de riesgos ambientales y Humanización del lugar de trabajo
- Se marcan productos terminados lo cual mejora la especificación del producto y general la calidad y apariencia
- Gran flexibilidad de modo que se pueden obtener diferentes tipos de escritura en la misma operación y se pueden realizar operaciones sucesivas completamente diferentes
- Control totalmente automático del proceso de escritura
- Es posible la escritura en casi todos los materiales sólidos
- ea marcados permanentes en forma instantánea
- El proceso en general es más rápido y preciso proporcionando gráficos de mayor definición
- Compatible con las paquets graficadores de computadora (AutoCAD, Coreidraw, etc.)

CAPÍTULO IV

4.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El siguiente estudio estará destinado para optimizar los parámetros de marcado en los siguientes materiales: acero inoxidable y acrílico, utilizando un sistema láser de media potencia, de esta manera se busca obtener las condiciones adecuadas para el proceso, para así tener una mayor calidad del producto. Para la selección de los materiales en estudio, se evaluaron aquellos de mayor aplicación en los procesos de marcado o grabado, tomando en cuenta la gran variedad de materiales que existen, por lo anterior se seleccionaron lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 22 (0.795 mm) y acrílico (6 mm) por ser materiales de los más comúnmente usados en la aeronáutica y además por ser materiales de un costo moderado. Con esto se pretende caracterizar el comportamiento de dichos materiales ante el marcado con láser, para posteriormente se pueda tener una tabla preparada de los parámetros de marcado el cual se ajuste a las características de la máquina.

En los anteriores capítulos se habló de los factores que afectan a estos materiales y su interacción del material con el láser. Por ello de las variables antes indicadas, mantendremos la forma y tamaño de la boquilla constantes, así como también el sistema óptico, esto es debido que no queremos modificar las condiciones normales de la máquina láser con que se cuenta en el laboratorio para así tener el mejor aprovechamiento de la misma. Para el ensayo de marcado con láser se cortaron secciones de una figura con una geometría semi-compleja que consiste en el perfil de un caballo de diámetro $\theta=31.6$ mm (1.25 in). Se empleó una lente de 63.3 mm de distancia focal (2.5 in) y un punto focal de 0.1714 mm de diámetro. Los parámetros a controlar fueron: posición focal (Pf), velocidad de marcado (Vm), la presión del gas (Pg) y la distancia de la boquilla a la superficie del material (Ds), frecuencia de pulso (D0), ancho de pulso (D1), modo de onda (pulsado o continua) y gas de proceso (aire comprimido (Ac) y oxígeno (O)). Estos parámetros tendrán un intervalo como referencia que se utilizaron para cada uno de los materiales ya mencionados.

La Posición del punto focal: Como es la distancia perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo a el punto focal; los efectos que se presentan al variar dicha posición son:

- Diferente diámetro del punto focal, lo que conlleva a una variación en la densidad de potencia en a superficie del material. Diferentes efectos se presentarán en el material de acuerdo al proceso de manufactura deseado, por esta razón se recomienda para el caso del marcado con láser puntos focales que se encuentren por encima de la superficie para tener una densidad de energía menor.
- Variación de la reflexión de la luz por la superficie de la pieza de trabajo.

- Variación de la reflexión interna.
- Ancho de profundidad de superficie de interacciones diferentes.

La profundidad de foco es la zona donde el punto focal presenta una divergencia prácticamente nula, siendo esta la región en la que no debemos encontrar cuando realicemos un corte.

La Distancia focal: Es la distancia entre el lente de la máquina y el punto focal, donde la localización de este punto se determina mediante los siguientes factores; cuando el haz entra a la lente, se logra enfocar en un punto infinitamente pequeño, y en general, las lentes con distancia focal de 5° poseen un espesor de foco grande (como se muestra en la fig. 4.1).

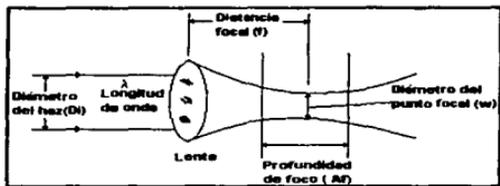


Fig. 4.1 Cálculo de la profundidad de foco.

El punto focal mínimo se determina con la siguiente ecuación:

$$\omega = (8 \cdot \lambda \cdot f) / (\pi \cdot D_i); \text{ diámetro del punto focal.}$$

Donde ω es el diámetro del punto focal en (mm), λ es la longitud de onda del haz en (nm), y D_i es el diámetro del haz en (mm), f es la distancia focal en (mm). La profundidad de foco se puede estimarse de la siguiente manera.

$$\Delta f = ((8 \cdot \lambda) / (\pi)) \cdot (f / d_1)^2; \text{ profundidad de foco.}$$

Donde Δf es el espesor de foco en (mm²).

Como el diámetro del punto focal no tiende a cero, existe un límite hasta el cual el haz puede ser enfocado sin sufrir distorsión, a este punto se le conoce con el nombre de Límite de Difracción.

De ésta manera se calculo el punto focal y la profundidad de foco:

Datos de fabricante:

$$D_i = 10 \text{ mm}$$

$$\lambda = 10.6 \text{ } \mu\text{m}, 10.6\text{E-}3$$

$$f = 2.5^\circ = 63.5 \text{ mm}$$

$$\omega = (8 \cdot (10.6\text{E-}3\text{mm})) / (\pi \cdot (10\text{mm})) = 0.1714 \text{ mm}$$

$$\Delta f = ((8 \cdot 10.6\text{E-}3\text{mm}) / \pi) \cdot (63.5\text{mm} / 10)^2 = 1.0884 \text{ mm}^2$$

La velocidad de marcado: Cuando se manejan velocidades de marcado menores 1000 mm/min, como consecuencia se tiene un mayor tiempo de interacción del láser-oxígeno con el material, lo que comprueba que el marcado de acero se dificulta al aumentar los aleantes de este (en especial al cromo). Es importante determinar si la velocidad de marcado es máxima en realidad o esta velocidad es más rápida, sin importarnos la calidad, si esto se refiere a la velocidad más rápida con la calidad mínima aceptable, o bien a la mejor combinación de calidad y velocidad. La velocidad máxima de marcado que se puede alcanzar en un material esta determinada por su geometría. Esto quiere decir que entre más compleja sea la geometría, menor será el promedio en la velocidad de marcado.

Para el proceso de marcado o grabado utilizamos velocidades de marcado de 4800 mm/min debido a que este proceso requiere de una menor penetración del haz incidente, en comparación con el corte, pues a mayor velocidad marcado se tiene un menor tiempo de incidencia del haz, y por lo tanto una menor evaporación y fundición de material.

Como el marcado o grabado tiene como objetivo principal el de no penetrar la totalidad del espesor del material, (ya que de lo contrario no se lograría marcar, sino cortar) se busca que la densidad de potencia sea la menor posible, por lo que usando el modo pulsado podemos obtener una menor potencia. Otro de los parámetros fundamentales para el marcado o grabado es el punto focal, ya que este será el lugar donde el haz incide, para nuestro caso colocamos este punto focal en la superficie y arriba de ésta, para obtener una menor densidad de potencia.

La Razones del gas de aporte: Proteger la óptica de focalización de los gases y polvos desprendidos en el proceso debido a la evaporación del material tratado, ya que estos gases son perjudiciales para la óptica utilizada. También se reduce el efecto de absorción de energía incidente por parte del gas expulsado por la vaporización del material.

La eliminación del material fundido principalmente en el marcado de metales, se elimina mecánicamente al fúndente producido en el proceso mediante un chorro de gas a presión. Para el proceso de marcado con láser se utilizó como gas de proceso al aire comprimido, ya que el contenido de oxígeno de este gas reacciona con el hierro, cromo y níquel del acero inoxidable produciendo una reacción de oxidación en el metal, la cual genera mucha energía calorífica (reacción exotérmica) que contribuye a la penetración del material. Estas penetraciones son menores a las obtenidas con el oxígeno como gas de proceso, esto es debido a composición de cada uno de los gases.

Distancia entre la boquilla y el material: Esta distancia afecta la distribución del chorro de gas en la superficie de trabajo, es decir, en el punto donde se concentró el flujo de gas. En los estudios anteriores se observó que los valores de las distancias de la boquilla al material, no varían considerablemente a los proporcionados por el fabricante. Por lo tanto en la investigación se consideró el valor recomendado por este.

Densidad de potencia: Es la energía que se presenta concentrada en la superficie del material por unidad de área, donde esta actúa vaporizando parte del material en forma proporcional. Ya que a mayor densidad de potencia mayor penetración y viceversa, si tenemos un control sobre este parámetro, para el proceso de marcado la vaporización del material tendrá que ser menor que la del corte, por lo tanto se requiere de una densidad de potencia menor. Así calculamos la densidad de potencia en términos de los siguientes parámetros.

$$d=0.01714 \text{ cm}$$

$$n=3.141593$$

$$P=116 \text{ Watts}$$

$$A=?$$

$$P_{\text{pot}}=?$$

Diámetro del punto focal.

Pi

potencia del haz.

Área del punto focal.

densidad de potencia.

$$A=\pi d^2/4=(3.141593) \cdot (0.01714)^2/4=2.307 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$P_{\text{pot}}=P/A=116/2.304 \cdot 10^{-4}=502743.51 \text{ w/cm}^2$$

Modo pulsado y continuo: Un láser CO₂ puede hacerse funcionar emitiendo un haz continuo o intermitente (pulsado). Donde el nivel de potencia de salida de una onda continua (Cw) es equivalente a la potencia total nominal para un modelo en particular de láser. Cuando opera en forma pulsada, el láser se modula electrónicamente para que el pulso que se emita tenga una potencia máxima intensificada, varias veces mayor que el nivel de potencia de onda continua.

La parte inicial de un pulso intensificado tiene un aumento pronunciado de energía, tal que produce una rápida vaporización del material o sustancia a la que se dirige el haz. Esta característica es útil para perforar, ya que la mayor parte de la energía del haz se emplea en vaporizar el material y no en calentar la zona que rodea al lugar donde se enfoca el láser. El modo de pulso intensificado es también útil para cortar, porque hay una fusión mínima de material circundante al punto de enfoque del haz y se reduce, entonces, la zona afectada por el calor (haz). Un pulso intensificado corto puede tener una potencia máxima de cinco a ocho veces la potencia de salida de onda constante (Cw). Este modo se aprovecha en aplicaciones en que la vaporización es útil, tales como perforar, grabar o cortar materiales. Un pulso largo puede ser configurado a modo

de obtener un borde frontal con una potencia máxima que puede ser cuatro o cinco veces mayor que la potencia de salida de la onda constante. Este pico es seguido por una disminución de potencia, para el resto de los pulsos, al menos el nivel de onda continua (como se muestra en la figura 4.2).

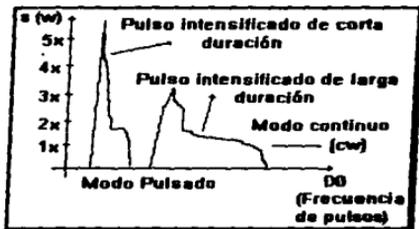


Fig. 4.2. Modo de onda continua y pulsada.

Es evidente que altas velocidades de repetición es menor la potencia máxima de los pulsos del láser. Estas condiciones son propias para el corte, perforación y operaciones de grabado. En las que se requiere altas velocidades de barrido sobre la superficie. Las frecuencias bajas son apropiadas para el grabado de cerámica. A bajas velocidades de repetición, la elevada potencia máxima del pulso concentra una zona reducida lo que reduce los problemas de transferencia de calor. Para nuestro caso se utilizó el pulso intensificado de larga duración, ya que este pulso nos proporcionó una penetración más homogénea con una potencia media que son parámetros ideales para el proceso de marcado.

4.2 PARÁMETROS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Mientras se estuvo experimentando con algún valor en particular se asignaron los demás parámetros para los valores óptimos sugeridos en la literatura del capítulo III.

PRUEBA 1

Caso I Acero inoxidable 304 para los siguientes rangos.

a) P_r de 0 a 3 mm en intervalos de 0.5 mm.

- b) Vm máxima de la máquina (4800 mm/min).
- c) Pg de 3 a 7 bar en intervalos de 1 bar.
- d) Ds de 0.8 mm constante.
- e) Potencia máxima de 60 Watts para el acero inoxidable 304.
- f) Modo del láser: pulsado.

Caso II Acrílico para los siguientes rangos.

- a) Igual que en el caso I (Incisos a, b, c, d).
- e) Potencia máxima para acrílico de 30 Watts.
- c) Modo del láser: pulsado.

PRUEBA 2

Para las pruebas de variación de la frecuencia (D0), ancho de pulso (D1) y velocidad de marcado (Vm), se tomaron en cuenta los parámetros óptimos obtenidos en la prueba # 1, para los siguientes rangos se experimentará combinándolos D0 y D1. Para después de obtenidos los valores óptimos de estos, se realice la experimentación con Vm.

Como los parámetros óptimos para el acero 304 que se obtuvieron fueron los de: S=60 W, Pg=4 bar, Vm=4800 mm/min, Ds=0.8 mm, M99 (D0=1, D1=20), Gas de proceso aire comprimido (Ac). Estas variables serán constantes (Pf=1.5 mm, Ds=0.8 mm, Pg=4bar, S=120W, Ac) en esta prueba. Donde los parámetros de frecuencia y ancho de pulso de acuerdo con el controlador numérico que la maquina utiliza (M99) tuvieron un rango con las siguientes características.

Rangos: M99

D0=1, 4, 8, 12, 16 D0 es la frecuencia de los pulsos 100 a 1600 c/s.

D1=1, 25, 50, 75, 100 D1 es el ancho de pulsos %.

Vm=500-3500 mm/min en intervalos de 500 mm/min

De acuerdo a lo recomendado por la literatura y a la capacidad de la máquina, los siguientes parámetros fueron los considerados:

Para acero inoxidable:

Pf=0.5

Vm=5000-20000 mm/min

Tipo de gas: Ac

S=60-120 Watts

Modo del láser: modo pulsado

Para el acrílico:

Pf=0.5 Vm =20000-24000 mm/min

S=20 Watts

Tipo de gas: Ac y nitrógeno

Modo del láser: modo pulsado

Con el fin de obtener un análisis estadístico experimental, se realizaron cinco grabados con condiciones idénticas en cada uno de los casos, una vez terminadas las pruebas se llevaron a cabo la evaluación de los siguientes puntos:

- 1) La observación del aspecto general del marcado, se llevo a cabo con el macroscópio Photomakroskop M400 (fig. 4.3), con el fin de determinar la mejor calidad de la marca en relación con su superficie (mejor acabado superficial y penetración más uniforme).
- 2) La medición de la profundidad de marcado (Pm), se realizó con el rugosímetro Mitutoyo Surftest 402 (fig. 4.2), pasando el indentador por la marca para después ser registrado por el rugosímetro, en donde mediremos la valle del registro, esto en el caso del acero inoxidable 304, para el caso de acrílico con el Proyector Profile Photooptical LP-10 (comparador óptico de fig. 4.4).
- 3) La medición del ancho del corte (Ac), se realizó a través del ocular con la escala del microdurómetro compacto Durimet Leitz Wetzlar (fig. 4.1).

Los valores óptimos experimentales de cada parámetro se determinaran mediante la evaluación de los puntos 1 al 3. La evaluación final del trabajo se realizó sólo con los valores óptimos aunque se evaluaron todos los resultados de las pruebas para ambos casos.



Fig. 4.1. Microdurómetro Durimet Leitz Wetzlar.



Fig. 4.2. Rugosímetro Mitutoyo Surftest 402.

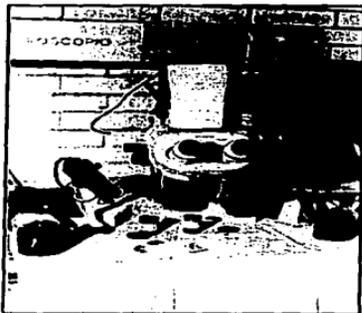


Fig. 4.3. Photomakroskop M400.



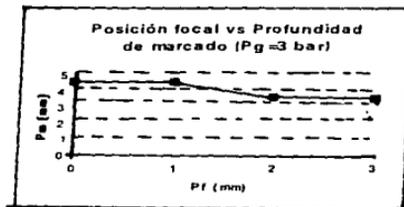
Fig. 4.4. Proyector Profile Photooptical LP-10.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

1.- Respecto a la variación del punto focal (Pf), para el caso del acrílico el rango permitido fue de 0 a 3 mm sin encontrarse un valor óptimo. Debido a que algunas partes de la figura marcada, se penetró el espesor total del material. Para el caso de el acero inoxidable 304 el rango de trabajo también fue de 0 a 3 mm de punto focal, siendo el valor óptimo de 1.5 mm.

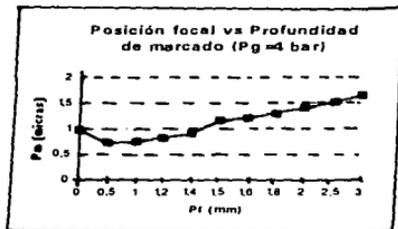
Los gases de proceso utilizados fueron aire comprimido, oxígeno y argón, pero solamente esto dos últimos se utilizaron para realizar pruebas considerando únicamente el valor óptimo obtenido con el aire comprimido, ya que con oxígeno se obtiene una marca irregular con escoria adherida, y para el caso del argón se obtiene un buen acabado y una marca más homogénea, pero con una penetración y ancho de marcado menores que la del valor óptimo. En ambos casos de la experimentación se utilizó principalmente aire comprimido como gas de proceso debido a que este gas resulta mucho más económico, además de que podemos obtener mayores penetraciones por la presencia de un porcentaje de oxígeno (21%).



Acrílico
 Gráfica 6.1



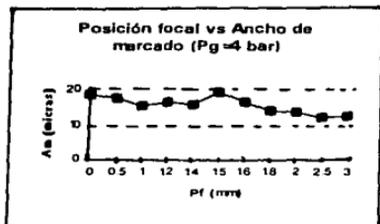
Fig. 6.1. Muestra de una marca con láser de un acrílico, gas: Ac, (10X).



Acero inoxidable 304
 Gráfica 6.2



Fig. 6.2 Muestra de una marca para un acero inox. 304, con Pf=1.5, gas: Ac, (10X).



Acero inoxidable 304
 Gráfica 6.3

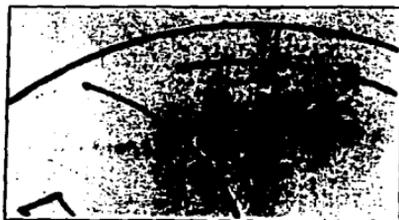
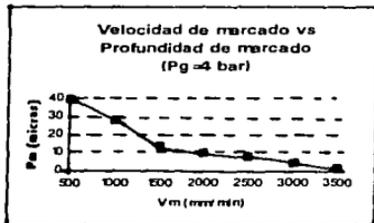


Fig. 6.3 Muestra de una marca con láser para un acero inox. 304, $P_f=1.5$, gas: Ac, (10X).

2.- La influencia que tuvo la velocidad de marcado sobre el acrílico se denotó a través de la permanencia del haz sobre un solo punto, ya que mientras la velocidad era menor a la de 4800 mm/min se observaba un marcado profundo que esta incluso llegaba a cortar el material.

Cabe señalar que, el valor de 4800 mm/min es un valor máximo que proporciona la maquina, por lo que este mismo valor se empleó para el caso del acero inoxidable 304 dando como resultado una penetración aceptable dentro del rango recomendado por la literatura, el cual es de 1 a 10 μ m máximo^{1*}. Para nuestro caso la profundidad de marcado para el acero inoxidable 304 fue de 1 mm.

De lo anterior se desarrolló un perfil de penetraciones variando la velocidad del marcado desde 3500 mm/min hasta 500 mm/min que es el valor mínimo utilizado, cuyo comportamiento corresponde a una variación exponencial, donde para las 10 μ m de penetración máxima se recomienda una velocidad de 1500 mm/min.

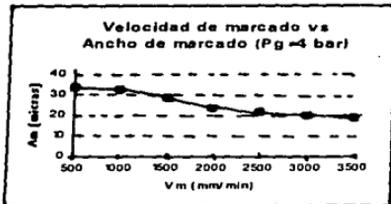


Acero inoxidable 304
 Gráfica 6.4



Fig. 6.4 Muestra de una marca con láser para un acero inox. 304, $V_m=500$, gas: Ac, (10X).

¹ * Proceeding of 1st international conference on lasers in manufacturing
 Publicaciones Ltd and North- Holland company
 Brihtbook 1983



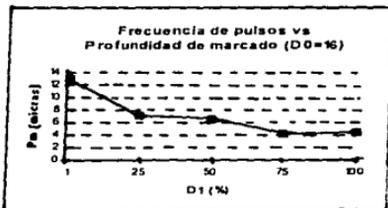
Acero inoxidable 304
 Gráfica 6.5



Fig. 6.5. Muestra una marca con láser a una Vm=500 mm/min, gas: Ac, (10X).

3 - Respecto al ancho de marcado (Am) se observó que con velocidades de 500 mm/min se incrementa la dimensión del ancho de la marca hasta 35 µm, pero cuando las velocidades son de 3500 mm/min, la dimensión disminuyó hasta un valor de 20 µm, donde los valores recomendados en la literatura son de 20 a 60 µm.

4 - Cuando la frecuencia de pulso es de 1600 c/s (1.6 KHz) y el ancho de pulso 1 % obtenemos una mayor penetración de marcado, sin embargo se tiene una marca muy irregular, aunque para un ancho de pulso de 50%, podemos tener una marca más regular, con una penetración y ancho de marcado moderados, así como vemos en las gráficas siguientes.



Acero inoxidable 304
 Gráfica 6.6

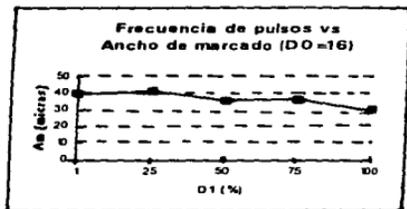


Fig. 6.6. Muestra una marca con una frecuencia de 1.6 KHz y un ancho de 50%, gas: Ac, (10X).

5 - Se hizo variación en las presiones del gas de aporte para eliminar la escoria y aumentar la protección de la lente, cuyas variaciones fueron de 3 a 7 bars, donde el valor óptimo fue de 4 bars.

* Proceeding of 1st international conference on lasers in manufacturing
 Publications Ltd and North-Holland company.
 Brightbook 1983

6.- La separación de la boquilla respecto a la superficie del material (Sb) permaneció con un valor constante de 0.834 mm, debido a que en estudios anteriores este parámetro no mostró mayor influencia (referencias 1 y 2).



Acero inoxidable 304
 Gráfica 6.7

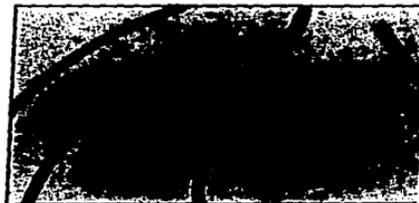


Fig. 6.7. Muestra una marca con una frecuencia de 1.6 KHz y un ancho de 75 %, gas: Ac. (10X).

Estos valores que aparecen en la siguiente tabla, son los valores óptimos obtenidos en las dos pruebas realizadas en la investigación, con una variación en su uniformidad de la superficie de la marca de 2 μ m.

Material	Potencia (W)	Velocidad de marcado (mm/min)	Pm y Am (μ m)		Posición focal (mm)	Presión del gas (bar)	Sb (mm)	Gas de proceso	M99	
			D0	D1						
Acero inoxidable 304 calibre 22	Prueba 1 50	4800	1	19	1.5	4	0.834	Aire	16	50
									75	
Acero inoxidable 304 calibre 22	Prueba 2 120	500	40	34	1.5	4	0.834	Aire	16	50
		1000	28	32						
		1500	13	19						
		2000	10	23						
		2500	8	22						
3000	4	20								
3500	1.5	19								

*Utilizése como gas de proceso, Argón solamente cuando se requiera de menores penetraciones y una buena calidad de acabado.

*El comando M99, D0= Frecuencia de los pulsos 1 a 16 o 100 a 1600 c/s, D1 = Ancho de pulso (%).

Tabla 6.1 Parámetros óptimos de marcado para un acero inoxidable.

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada, nos permite el control de los parámetros de marcado con un número reducido de pruebas, de manera que la calidad de las piezas marcadas con láser dependerán de los parámetros de marcado. El criterio que se consideró para la selección de la mejor marca fue:

- Mejor acabado superficial.
- Penetración y ancho de marcado uniforme.

Las gráficas representadas en el capítulo anterior fueron generadas con los valores promedios, por lo que puede considerarse como un todo del proceso. Una vez analizados estos resultados podemos llegar a las siguientes conclusiones.

1.- Al variar la posición del punto focal (**Pf**), estamos ocasionando que la densidad de energía tenga una variación sobre la superficie de la pieza. Esto quiere decir que con puntos focales de mayor dimensión a 0 mm, partiendo de la superficie la densidad de energía será menor. Por esta razón es que todos los puntos focales se seleccionaron positivos, ya que para el proceso de marcado la densidad de energía tiene que ser menor que la del corte, debido que no se debe penetrar el total del espesor del material.

Para el caso de un acero inoxidable 304 se obtuvo un valor óptimo para un punto focal de 1.5 mm, ya que para este valor la penetración se comportó más uniforme en la marca, esto fue debido a que la densidad de energía es moderada permitiendo que la evaporización y fundición del material sea más homogéneo. Para el caso del acrílico no se obtuvo un valor óptimo, ya que la penetración del material fue total en algunas partes de la figura.

2.- La velocidad de marcado (**Vm**) es uno de los parámetros que tiene un gran efecto sobre la profundidad y ancho de marcado. Con velocidades de marcado de (1000 mm/min o menores) el haz incide más tiempo sobre la superficie a marcar, y por lo tanto se tiene una mayor evaporización y fundición de material, obteniéndose así una mayor penetración y ancho de la marca, lo contrario sucederá si las velocidades son 3500 mm/min.

Para el caso de la experimentación se mantuvo la velocidad de marcado como una constante ($V_m=4800$ mm/min) para la **prueba 1**. Para que de esta manera se determinará algunos parámetros y con base en éstos, ir variando los otros parámetros como **Vm**, **D0** y **D1**, para realizar la menor cantidad de pruebas.

3.- Manejando presiones moderadas de gas de proceso (P_g), se logran marcas prácticamente libres de escoria debido al alto impulso del gas. Si las presiones del gas de proceso son elevadas (6 y 7 bars) deterioran las superficies marcadas. Sin embargo con presiones bajas (1 y 3 bars) la remoción de escoria es menor, es por ello que el valor óptimo obtenido es de 4 bars.

El gas de proceso que, se seleccionó fue el aire comprimido, debido su acción corrosiva es menor que la del oxígeno, pues su contenido de oxígeno es de 21% de O, 78% N, 1% de Ar y también en pequeñas cantidades de CO, H, He, Ne, Kr y Xe. La reacción que sufre el oxígeno con el cromo ocasiona que el punto de fusión del óxido de cromo sea menor, permitiendo una mayor evaporización y fundición del material. Por esta razón es que el corte de materiales se recomienda al oxígeno como gas de proceso, pero para el caso del marcado se recomienda al aire comprimido debido a su menor contenido de oxígeno, no permite grandes penetraciones y su cantidad de escoria adherida es mínima.

En vista que el marcado con oxígeno presentó deficiencias a comparación con el marcado con aire comprimido, se decidió sustituir al oxígeno por aire comprimido, aprovechando al mismo tiempo la ventaja económica y calidad de esta sustitución.

Usando argón como gas de proceso, obtenemos una marca prácticamente libre de escoria y una buena definición de las líneas de la figura. Esto quiere decir que se tiene una buena calidad de marcado, como en el caso del aire, pero no se puede tener penetraciones demasiado profundas. Sin embargo para el caso del aire, se pueden tener penetraciones grandes debido a la reacción exotérmica que se genera con un % oxígeno que se encuentra presente, por lo anterior, se decidió seleccionar al aire comprimido por su ventaja económica y sus mejores características de procesamiento.

4.- La potencia máxima que entrega el láser en un pulso esta relacionada a la energía del haz y la duración del pulso. Si se realizan operaciones con pulsos de duración prolongada, se producirá un exceso de vaporización y fundición de material, obteniéndose así, una marca más uniforme por el comportamiento del pulso. Este pulso se recomienda para procesos de marcado debido a que nos proporciona una potencia media y un tiempo de frecuencia mayor, lo que nos permite tener marcas más uniformes en su superficie.

Para el caso del proceso de barrenado se recomiendan pulsos de corta duración, ya que este pulso nos proporciona una potencia inicial máxima de corto tiempo, de modo que su penetración es mayor sin tener una vaporización sino una fundición amplia del material.

La velocidad de marcado esta muy relacionada con la densidad de potencia en la superficie del material, pero esta densidad de potencia es un parámetro difícil de controlar con el equipo **EMCO LS-140**, ya que el programa de control numérico maneja una potencia predeterminada y cuando la máquina esta en funcionamiento se tiene un valor que tiene un rango de variación cercano al del programa. Para los casos de frecuencia de pulso y ancho. Se enuncia anteriormente que pulsos de media potencia requiere de frecuencias 1 KHz en adelante para obtener una marca más uniforme en su penetración y ancho de marcado de los cuales se obtuvieron los siguientes valores óptimos:

D0=1600 C/S=1.6 KHz

D1=50%

5.- Con las presiones elevadas de aire comprimido se mejoró la calidad de marcado, incluso, la escoria analizada en todas las pruebas fue casi nula, salvo en el caso donde se utilizó oxígeno como gas de proceso en donde se observo mayor adhesión de escoria, por lo tanto, el valor óptimo, para la presión del gas de proceso para el aire comprimido el valor fue de 4 bar.

6.- La potencia resultó ser un parámetro significativo, ya que con el aumento o disminución de ella en relación con la velocidad de marcado, podemos obtener una mayor o menor penetración en el material. Al obtener el valor óptimo de grabado se observó que si se requería de mayor penetración con la misma calidad se tendría que disminuir la velocidad de marcado y aumentar la potencia.

RECOMENDACIONES

La optimización del proceso de marcado o grabado para el sistema **EMCO LS-140**, puede lograrse para materiales como plásticos, hule, madera, etc., con una densidad potencia menor. Para obtener esta densidad de potencia se recomienda comprar una lente de 5 in de longitud focal por su mayor profundidad focal y por las características inherentes en el proceso de marcado que se puede realizar con la configuración actual de la maquina **EMCO LS-140**.

Para poder marcar con el equipo existente en el laboratorio, hay dos tipos de modo de onda, el pulsado y el continuo. Las literaturas nos recomiendan el modo pulsado por sus mejores características para el proceso de marcado, en la experimentación nos pudimos percatar que era el modo que mejor acabados nos proporcionaba. Sin embargo también se puede usar el modo continuo, aunque se obtiene menor penetración y una apariencia irregular a excepción del marcado con argón.

Finalmente proponemos a manera de continuación de éste estudio, realizar pruebas con otros materiales, se recomiendan cerámicos y metales. Pero de una manera más general con óxido de aluminio, titanio, porcelana, y tungsteno de uso común en la industria electrónica y aeronáutica.

APÉNDICE A

ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR:

Conducción:

Éste sucede cuando el haz interactúa sobre la pieza de trabajo. A una temperatura homogénea el gradiente de la sustancia es el resultado de la rapidez de la transferencia calculada con:

$$Q = -kA(\Delta T/\Delta N); \quad \Delta T/\Delta N \text{ el gradiente en dirección de la normal}$$

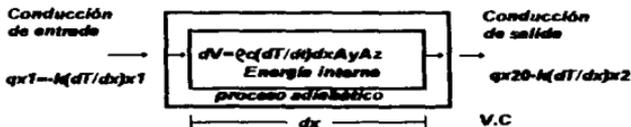
A= área transversal de transferencia

k= conductividad térmica que depende de la temperatura y presión.

Donde: $k = k_0(1 + b\theta + c\theta^2)$; $\theta = T - T_{ref}$ y k_0 conductividad de referencia

Tomando una temperatura relativa $k = k_0(1 + b\theta)$

El análisis de la transferencia de calor es el estimaría distribución de temperatura y la velocidad de transferencia. Por medio de un control de volumen termodinámicamente para una sustancia incompresible.



Según Fourier

Convección:

Siempre que un sólido es expuesto al movimiento de un fluido a una diferencia de temperaturas, esta energía puede ser acarreada por convección, la cual es energía térmica removida por un flujo de masa. Si la temperatura ambiente es la del fluido desde k superficie entonces T_x y la temperatura del sólido T_s , y el área expuesta al fluido, donde la transferencia de calor es por unidad de área.

$$q = hA(T_s - T_\infty); \text{ Según Newton}$$

$h =$ al coeficiente de transferencia convectivo



Radiación:

Es el tercer modo de transferencia de calor que está dada por la propagación de la onda electromagnética, lo cual ocurre con un total vacío del medio. La evidencia experimental indica que la transferencia de calor por radiación es proporcional a 4 veces la diferencia de temperatura lineal. En casos difíciles es asumido la idealización de la radiación.

$$q = AT^4$$

Donde: $T =$ Temperatura absoluta

$A =$ Área de la superficie

$h = 5.66970 \text{ w/m}^2\text{K}^4$ Constante de Boltzman



APÉNDICE B

%1234

(* Maquina : LASER *)
(* Controlador: EMCO-Tronic *)
(* Fecha : 22/01/96 fzf *)
(* 08/05/96 123 caba *)

N0000 G53 G55 G71 G94
N0010 T0101 S40 F4000 (** laser 120)
N0020 M98 D0=10 D1=30
N0025 M99 D0=1 D1=30
N0030 G00 X4.959 Y13.769
N0040 M08 G04 D4=1
N0050 M03 M24
N0060 G01 U0 V0 D0=5 D1=1 D2=255 D3=500 D4=100 D5=100
N0070 G03 X14.295 Y-0.795 I21.312 J3.388
N0080 M23 M05 M09
N0090 G00 X0.439 Y-1.247
N0100 M08 G04 D4=1
N0110 M03 M24
N0120 G01 U0 V0 D0=5 D1=1 D2=255 D3=500 D4=100 D5=100
N0130 G03 X7.902 Y-12.003 I11.592 J0.076
N0140 M23 M05 M09
N0150 G00 X3.516 Y-12.957
N0160 M08 G04 D4=1
N0170 M03 M24
N0180 G01 U0 V0 D0=5 D1=1 D2=255 D3=500 D4=100 D5=100
N0190 G02 X-1.814 Y13.607 I-2.665 J13.282
N0200 G02 X1.946 Y13.828 I2.665 J-13.282
N0210 G01 X3.092 Y15.636
N0220 M23 M05 M09
N0230 G00 X0.104 Y9.089
N0240 M08 G04 D4=1
N0250 M03 M24
N0260 G01 U0 V0 D0=5 D1=1 D2=255 D3=500 D4=100 D5=100
N0270 G03 X-0.058 Y0.702 I0.0 J-4.195
N0280 G02 X9.066 Y-6.023 I-4.445 J-15.583
N0290 G01 X10.533 Y-5.29
N0300 G02 X10.472 Y-3.233 I1.584 J1.077
N0310 G02 X12.288 Y-4.413 I0.047 J-1.915
N0320 G01 X13.548 Y-3.783
N0330 G01 X13.921 Y-2.289
N0340 M23 M05 M09
N0350 G00 X5.519 Y5.553
N0360 M08 G04 D4=1
N0370 M03 M24
N0380 G01 U0 V0 D0=5 D1=1 D2=255 D3=500 D4=100 D5=100
N0390 G03 X4.399 I-0.56 J0.0
N0400 G03 X5.519 I0.56 J0.0
N0410 M23 M05 M09

Apéndice
Facultad de Ingeniería

N0420 G00 X16.425 Y0.722
N0430 M08 G04 D4=1
N0440 M03 M24
N0450 G01 U0 V0 D0=5 D1=1 D2=255 D3=500 D4=100 D5=100
N0460 G03 X-15.244 I-15.835 J0.0
N0470 G03 X16.425 I15.835 J0.0
N0480 M23 M05 M09
N2330 M30
N2340 (** TIEMPO TOTAL : 2.803)
%

BIBLIOGRAFÍA

- **Maquinado de metales en máquinas herramientas**
John. L. Feirer
Editorial. CECSA., 1982
Pag. 607-656
- **Modern manufacturing process engineering**
Benjamin W. Niebel, Alan B. Draper y Richard A. Wysk
Editorial McGraw-Hill., 1989
Pag.136-200
- **Procesos básicos de manufactura**
H. C. Kazanas, Glenn E. Baker y Thomas Gregor
Editorial McGraw-Hill., 1987
Pag. 245-264
- **Procedimientos de fabricación y control**
José M. Lashares y Hector Arias San Vicente
Editorial CEDEL., Vol. II., 1980
Pag. 563-572
- **Tool and manufacturing engineers handbook**
SME (Society of manufacturing engineer's)
Daniel B. Dallas., 1976
Pag. 13.18-13.21
- **Lásera operación equipo, uso y diseño**
E. E. Coherent
Editorial Noriega., 1992
Pag. 66-95
- **Tratamiento de las superficies de plástico**
Klaus Stoekherth
Editorial Gustavo Gillsa., 1977
Pag. 245-260
- **Introducción al análisis químico de los plásticos**
José González Ramos
Editorial BLUME., 1970
Pag. 141-146
- **Lasers and their aplications industrial**
Paker P.
Editorial Prentice-Hall., Englewood 1985
Pag. 87-93
- **Power carbon dióxido laser scientific**
Patel C. y High
Editorial American., Vol. 3, 1968
Pag. 23-33

- **Industrial application of laser**
John F. Ready
Editorial Prentice-Hall., 1973
Pag. 233-239
- **Laser technology and laser driven processes**
Dr. Stjepan Lugomer
Editorial Prentice-Hall., 1989
Pag. 215-327
- **Aplicaciones industriales del láser**
L. Bachs, J Cuesta y N. Charles
Editorial Marcombo., 1988
Pag 141-152
- **Introducción a la metalurgia física**
Auner
Editorial McGraw-Hill., 1988
Pag. 251-397
- **Laser machining theory and practical**
George Chrystalouris
Editorial Verlag., 1991
Pag. 23-46, 209-265
- **Plastics finishing and decoration**
Donetas Sates
Editorial Van Nostrand., 1986
Pag. 4.128-8.93
- **La ciencia e ingeniería de los materiales**
Donald R. Askelang
Editorial Iberoamérica., 1987
Pag. 235-359

PUBLICACIONES

- **Techniques and applications of laser marking**
John B. Willis
Publicaciones Laser lines limited Bonbury, Oxon, England.
- **Proceeding of 1st international conference on lasers in manufacturing**
Publicaciones Ltd and North- Holland company.
Brightbook 1983
- **Manufacturing engineer's**
Dai Koshai, Butterwort y Heinemann
Publicación 1993
Pag. 3-35

- Laser marking
Paul D. Hartung
Publicaciones Somerville
Massachusetts 1989
- Investigación y ciencia
H. Kent Bowen
Publicaciones Scientific American., 1987
Pag. 135-140
- Physics reserch at Heriot-Watt:
Laser physics and engineering
Professor Dr Hall, H. J. Baker y J. D Jones
Publicaciones Numberall stamp and tool Co., Inc., 1995
- Advanced manufacturing technology
David L. Goetsch
Publicaciones Delmar Inc., 1990
Pag. 224-234

REFERENCIAS

- (1) Optimización del proceso de corte con láser para un acero inoxidable 304.
Presenta: Miguel A. Arce Morales
Publicaciones UNAM FI., 1996
- (2) La optimización del corte con láser para un acero 304.
Presenta: Pablo Barrero
Publicaciones UNAM FI., 1985