



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA PARA INSERTOS DE PLAQUITAS DE CUCHILLAS SOLDADAS

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Eddy Alejandro González Arias

Tutor: Prof Tit. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.

Moa - 2017



Declaración de autoridad

Yo: Eddy Alejandro González Arias

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Eddy Alejandro González Arias

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

Agradecimientos

A Dios por darme las fuerzas necesarias para lograr que todo este trabajo cumpliera su fin.

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mi tutor por confiar en mí en la realización de este trabajo el Prof. Tit. Tomás Fernández Columbié
Dr. C.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mí.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la Revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .

A todos Muchas gracias.



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

A mi madre y padre: Yanelis Aria Vázquez y José Enrrique González Machado por su amor eterno.

A mis abuelos: Justina, José y a mi hermana Lianet por regalarme su cariño incondicional.

A mis tías y tíos en especial a Rafael y a mi novia Yamile Martínez Cortina por su amor y dedicación.

A mis vecinos del edificio por apoyarme en momentos difíciles.

A mis amigos que estuvieron a mi lado durante los 5 años de mi carrera.

A nuestra Revolución, por las posibilidades que me ofrece.

Pensamientos



“Creo en el milagro de lo que puede hacer el trabajo, de lo que puede hacer la ciencia y de lo que pueden hacer los hombres”.

Fidel Castro Ruz

“El conocimiento es experiencia, todo lo demás es información”.

Albert Einstein.



RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural que se obtiene durante la unión de insertos metálicos del tipo TK con el empleo de soldadura por difusión y oxiacetilénica. Fueron analizadas dos tipos de cuchillas que fueron soldadas por ambos procesos, donde para observar la estructura resultante, se hizo necesario el encapsulado de las muestras. Se determinó el costo de factibilidad en ambas cuchillas. Durante el análisis microestructural se determinó que durante el primer proceso, se obtiene en el material de aporte, estructuras de granos columnares, compuesto por la presencia de fase β' y fase α y en el segundo las mismas estructuras, con la presencia de precipitados y granos alargados que ofrecen menor resistencia. En la microestructura analizada en el mango de cada cuchilla, se observó que se genera una reducción del tamaño de grano, impuesto por un ciclo térmico de 3 550 °C, esta temperatura provoca que al existir granos de menor tamaño, también exista menor resistencia mecánica en la cuchilla. Para evaluar los costos de factibilidad del empleo de insertos de cuchillas soldadas, se consideró que en estas herramientas, el costo se refiere al maquinado de una pieza que demora $t_s = 60$ minutos para un ángulo de incidencia de 6° y uno de desprendimiento de 10°. Por último se realiza la valoración económica y el impacto medioambiental.



ABSTRACT

The aim of this work is to establish the microstructural behavior obtained during the union of metallic inserts of the TK type with the use of diffusion and oxyacetylene welding. Two types of blades were analyzed that were welded by both processes, where to observe the resulting structure; it became necessary to encapsulate the samples. The cost of feasibility was determined on both blades. During microstructural analysis was determined that during the first process, columnar grained structures were obtained in the input material, composed of the presence of phase β 'and phase α and in the second was determined the same structures, with the presence of precipitates and elongated grains that offer less resistance. In the microstructure analyzed in the handle of each blade, it was observed that a grain size reduction, imposed by a thermal cycle of 3 550 °C, this temperature generated, that when there is a smaller size, there is also a lower mechanical resistance in the knife. In order to evaluate the feasibility of the use of welded blade inserts, it was considered that in these tools, the cost refers to the machining of a workpiece that takes 60 minutes for an angle of incidence of 6° and one of 10° detachment. Finally, the economic assessment and the environmental impact were carried out.



TABLA DE CONTENIDOS

SÍNTESIS	Pág
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	4
1.2. Características de las herramientas de corte monofiló	4
1.3. Clasificación de los carburos cementados	6
1.3.1. Parámetros microestructurales de los compuestos de carburo	9
1.4. Herramientas recubiertas	10
1.5. Soldadura de insertos de carburo en la fabricación de herramientas	12
1.5.1. Parámetros a considerar en la soldadura de insertos en herramientas de corte	15
1.5.2. Geometría de la herramienta de corte	17
1.6. Soldadura fuerte por antorcha o soplete	18
1.6.1. Tipos de llamas en la soldadura oxiacetilénica	20
1.7. Conclusiones del capítulo 1	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	24
2.2. Geometría de corte de la herramienta monofiló	24
2.3. Características del material de la plaquita	25
2.3.1. Material de aporte empleado en la soldadura	26
2.4. Plan experimental	27
2.4.1. Área para la selección de las muestras	28
2.4.2. Toma o corte de la muestra	28
2.4.3. Encapsulado de las muestras resina epoxi ROYAPOX – 5050	29
2.4.4. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050	30
2.4.5. Proceso de desbaste y pulido	30
2.4.6. Lijado grueso y fino	31
2.4.7. Ataque de las muestras para su examen microscópico	31
2.5. Equipos empleados en la experimentación	32
2.5.1. Observación con microscópica óptica	33
2.5.2. Ensayos de microdureza	33



2.5.3. Pulidora metalográfica Montasupal	34
2.6. Calculo de factibilidad entre los procesos de soldadura	34
2.7. Cálculo de la velocidad de corte	38
2.8. Vida útil de la herramienta	38
2.9. Conclusiones del capítulo 2	40
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
3.1. Introducción	41
3.2. Determinación de la factibilidad en las cuchillas	41
3.3. Análisis de los cálculos de factibilidad para las cuchillas	42
3.3.1. Análisis de los parámetros para la cuchilla soldada	42
3.3.2. Análisis de los parámetros para el costo del afilado	44
3.3.3. Resultados del afilado para las cuchillas	46
3.4. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura por difusión	48
3.4.1. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura oxiacetilénica	49
3.4.2. Análisis microestructural del mango de las cuchillas	50
3.5. Análisis del tiempo de vida útil de la herramienta	52
3.6. Análisis de la microdureza	53
3.7. Valoración económica	54
3.8. Valoración del impacto medio ambiental	54
3.9. Conclusiones del capítulo 3	57
CONCLUSIONES GENERALES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las partes metálicas de las máquinas herramientas, instrumentos y otros artículos son producidos por fundición de moldes, por conformación mecánica, por procesos eléctricos y químicos y por corte de metal. El proceso de corte consiste en remover partículas de metal de una pieza en bruto para obtener un componente maquinado de la forma y dimensiones requeridas y con la calidad de la superficie especificada.

Generalmente en el desarrollo de la civilización y la ingeniería el trabajo realizado por el esfuerzo muscular del hombre, se ha sustituido por máquinas herramientas especiales para el corte de metales. Las herramientas de corte son las que actúan directamente sobre la pieza en bruto, de la cual se va a obtener la pieza terminada. Estas herramientas han revolucionado el corte de metal, consiguiendo con el paso del tiempo aumentar su rendimiento y sus parámetros de trabajo, esto gracias al descubrimiento de nuevos compuestos y aleaciones con mejores características mecánicas.

La eficiencia y confiabilidad son características buscadas incansablemente por la ciencia e ingeniería. Esto conlleva al desarrollo de nuevas tecnologías las cuales ponen al servicio de la industria en general, soluciones que aumentan las prestaciones de los componentes mecánicos involucrados.

En toda operación industrial, un problema de consideración en el mantenimiento de herramientas, equipos y maquinarias, es el de minimizar el desgaste o recuperar las piezas desgastadas, cuyo costo es menor que el reemplazo de las mismas, para lo cual es importante reconocer el problema y la forma de recuperarlas, que por lo general, implica la aplicación de un recubrimiento duro y un maquinado para su acabado. Pero ello no lo es todo, lo primordial es conocer el cómo y con qué material reprocesar la pieza; para esto es necesario saber seleccionar el tipo adecuado de recubrimiento y el proceso de aplicación de éste.

Los recubrimientos tipo Cermets son generalmente depositados por técnicas de rociado térmico, ya que estos procesos ofrecen un método efectivo y relativamente económico para proveer buena resistencia al desgaste sin comprometer otros atributos del componente. Uno de los procesos más adecuados para depositar estos materiales, es la proyección térmica de alta velocidad (HVOF por sus siglas en ingles).

Por su parte la soldadura por arco transferido es una evolución de la soldadura TIG, la cual permite depositar compuestos metálicos o mezcla metálico-cerámico de manera mucho más precisa y a menores temperaturas, evitando así variaciones de las propiedades del sustrato. Esta técnica permite una baja disolución por fusión entre el recubrimiento y el sustrato y así no perder a baja profundidad las cualidades del material de aporte.

En el mundo la recuperación de piezas desgastadas por abrasión o corrosión con metalizados y recubrimientos es cada vez más utilizada, estudiando nuevos y mejores materiales, métodos más eficientes de depósito protegiendo el material base y obteniendo superficies con menos rugosidad superficial, mayor adherencia al sustrato y extrema resistencia al desgaste abrasivo.

Situación problemática

En la empresa Mecánica del Níquel (EMNI) “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, se han venido presentando algunos problemas en la Unidad Empresarial de Base (UEB) de maquinado con las cuchillas de corte, del tipo TK, las que en ocasiones se les desprenden las plaquitas de corte en los procesos de maquinado, volviéndose inutilizables para estos procesos. Estas cuchillas han sido fabricadas por los propios trabajadores de esta entidad a través de procedimientos manuales sin que se conozcan los cambios microestructurales que se originan en la herramienta. La rotura de estas cuchillas, afectan directamente el proceso productivo ocasionando retrasos, incurre en gastos económicos, desechos vertidos al medioambiente y dificulta el trabajo de los operarios que trabajan con este tipo de herramientas.

El **problema** a investigar lo constituye

Aún son insuficientes los estudios relacionados con el comportamiento microestructural en plaquitas de cuchillas soldadas por procesos controlados, así como de plaquitas de este tipo soldada por proceso de soldadura oxiacetilénica.

Se establece como **hipótesis**

Si se realiza un análisis de los cambios a niveles microestructurales de los depósitos de soldadura en las cuchillas TK, obtenidos mediante procesos controlados y se compara con los obtenidos mediante soldadura oxiacetilénica, entonces sería posible detectar defectos estructurales que nos permita determinar las causas que están dando lugar a

estos defectos, mejorando así la calidad de la sujeción de las plaquitas en los mangos de la cuchilla TK

Se plantea como **objetivo general**

Caracterizar el proceso de unión por medio de soldadura controlada y por soldadura oxiacetilénica en el proceso de fijación de plaquitas de carburo de tungsteno al cuerpo de la herramienta de corte.

El **objeto de estudio** es el proceso de soldadura de las plaquitas del tipo TK por métodos controlados y por soldadura oxiacetilénica.

El **campo de acción** es la microestructura de la zona fundida entre la plaquita y el electrolito, así como la microestructura de dicha plaquita.

Objetivos específicos

1. Definir los procedimientos de fabricación por soldadura para la sujeción de plaquitas metálicas en cuchillas empleadas en los procesos de maquinado en el torno.
2. Establecer el procedimiento metodológico empleado en el proceso de soldadura de plaquitas metálicas del tipo TK en cuchillas de torno.
3. Caracterizar las zonas formada por la influencia del ciclo térmico de la unión soldada en base a la microestructura obtenida del proceso de soldadura de las plaquitas del tipo TK por métodos controlados y por soldadura oxiacetilénica.

Tareas del trabajo

1. Establecimiento del estado del arte y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Planificación y realización de experimentos.
3. Análisis de resultados y obtención de las microestructuras resultantes de los procesos de soldadura por difusión en las cuchillas de corte TK.
4. Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas que surgen en el proceso de soldadura cuando se somete a proceso de unión por difusión.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de rotura y de la soldadura.

Capítulo 1

Marco teórico. Antecedentes investigativos

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

El proceso de corte consiste en remover partículas de metal de una pieza en bruto para obtener un componente maquinado de la forma y dimensiones requeridas y con la calidad de la superficie especificada. El maquinado con herramienta de punta única es uno de los más importantes dentro de la gran cantidad de métodos usados para el maquinado de metales. Los tres tipos de herramientas de punta única son las de torno, de acepilladoras y de recortadoras. Las herramientas para torno son utilizadas en ellos y en máquinas similares para la obtención por maquinado de piezas cilíndricas, cónicas, contorneadas y superficies planas, todas producidas como resultado de la rotación de la pieza y el desplazamiento de la herramienta, este proceso es conocido como torneado.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar el análisis de las bibliografías existentes relacionadas con los procesos de soldadura de las plaquitas de cuchillas empleadas en el proceso de maquinado por torneado.

1.2. Características de las herramientas de corte monofilo

Por herramientas se entiende a aquel instrumento que por su forma especial y por su modo de empleo, modifica paulatinamente el aspecto de un cuerpo hasta conseguir el objeto deseado, empleando el mínimo de tiempo y gastando la mínima energía. La herramienta de corte en el mecanizado por arranque de virutas se le denomina cuchilla (figura 1.1) y está compuesta por el mango, fabricado de acero al carbono y la cabeza, donde se aloja la plaquita metálica, generalmente de carburos cementados o aleaciones duras (Rodríguez *et al.*, 2009 y Childs, 2006).

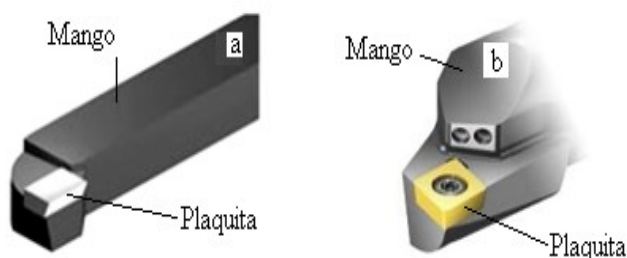


Figura 1.1. Portaherramientas con plaquita. (a) soldada, (b) intercambiable.

Hasta ahora se han entendido las herramientas de corte como una pieza enteriza del material requerido, pero en el caso de herramientas de metal duro, no sería viable que fuera fabricada totalmente de carburos, además de un costo muy elevado, no tendría la suficiente tenacidad para soportar los esfuerzos a los que se somete durante el corte.

Kalpakjian y Schmid (2008) partiendo de lo anteriormente expuesto propone dividir la herramienta en dos partes, por un lado el portaherramientas, de un material suficientemente tenaz que evite vibraciones en la medida de lo posible y por otro lado una pequeña herramienta del material necesario alojada en el extremo. Por lo que la verdadera herramienta de corte es lo que se conoce como inserto o plaquita.

La unión de plaquitas al portaherramientas suele ser soldadas como la de la figura 1.1 (a) y mecánica mediante un tornillo, como es el caso de la plaquita mostrada en la figura 1.1 (b). En el primer caso no es menos común debido a que se requiere que la precisión de la soldadura sea elevada para no generar tensiones y deformaciones en la plaquita, además de que solo dispone de un filo de corte.

Boothroyd (2002) considera que el uso de plaquitas tiene una ventaja adicional. En las herramientas de un solo cuerpo, una vez se gasta el filo de corte hay que proceder a afilarlo, esto supone desmontar la herramienta, proceder a recuperar los filos de corte de la herramienta en los ángulos adecuados y un posterior montaje en la máquina. Esto lógicamente conlleva un tiempo elevado y por tanto un aumento del costo de producción.

Cuando se trata de máquinas herramienta convencionales generalmente se considera que el empleo de herramientas de cambio rápido no se justifica económicamente por dos razones: a) estas herramientas son más bien caras y b) las máquinas convencionales no tienen la capacidad para explotar todas las posibilidades de estas herramientas. Aunque estas dos afirmaciones son en general ciertas, existen evidencias, al menos para algunos casos particulares (Rivas, 1998 y Vidal, 1999), de que estas herramientas no están vedadas a las máquinas herramienta convencionales.

Por otro lado, también se dispone de referencias (Vidal y López, 1998) que muestran la factibilidad técnico-económica de fabricación en el país de los soportes portaplaquitas o mangos, que constituyen el elemento más costoso de estas herramientas. Es decir, se

dispone de elementos que permiten considerar el empleo de estas herramientas en máquinas convencionales.

1.3. Clasificación de los carburos cementados

Los carburos cementados (hard metals) son el tipo de materiales duros, resistentes al desgaste y refractarios compuestos por partículas de carburos duros enlazadas o cementadas a un aglomerante metálico dúctil. Los materiales a base de WC - Co son utilizados para una gran variedad de aplicaciones, tales como corte de metales, minería, construcción, agujereado de rocas, conformado de metales, componentes estructurales y partes de desgaste. Aproximadamente, el 50 % de toda la producción de carburos es empleada para corte de metales (Tong *et al.*, 2009).

El proceso de fabricación, basado en la metalurgia de polvo y su control riguroso es imprescindible para la obtención de un producto final con las propiedades deseables (Santhanam *et al.*, 1990).

El carburo cementado más utilizado es el carburo de tungsteno (WC) con un aglomerante de cobalto (Co) que forma así la llamada categoría de carburos de grado puro (sin alear). Estos materiales han sido modificados con la adición de otros carburos refractarios, tales como, carburo de titanio (TiC), carburo de tántalo (TaC), carburo de niobio (NbC) y carburo de vanadio (VC), en la fase dúctil la modificación involucró la utilización de otros metales de transición, constituyendo así, la llamada categoría de carburos de grado complejo (Santhanam *et al.*, 1990, Upadhyaya 2001).

Karpat y Özel (2008) plantean que con una geometría adecuada, (ángulos de corte) las herramientas calzadas con carburos cementados (figura 1.2) pueden alcanzar velocidades de corte de 2 700 m/min en el maquinado del acero 45 y 5 000 m/min en el maquinado del aluminio.



Figura 1.2. Diferentes tipos de carburos cementados.

Además pueden ser utilizados para maquinar componentes con alta dureza (hasta 67 HRC). Los carburos cementados ocupan actualmente el lugar más importante entre los materiales para herramienta, han sustituido un gran número de renglones y se fabrican con ellos instrumentos de punta única, fresas, barrenas, escariadores.

Los carburos cementados se clasifican según la operación a realizar. En la producción de herramientas de corte se utilizan los carburos de tungsteno: compuestos de granos de carburos de tungsteno en una matriz de cobalto. Ejemplos: BK2, BK3M, BK4, BK6, BK6M, BK8 y BK8B (GOST).

Los carburos de titanio - tungsteno constituido por granos de una solución sólida de carburos de tungsteno en carburos de titanio, en una matriz de cobalto, a las que se les pueden añadir granos de carburos de tungsteno adicionales. Los grados más utilizados son: T15K6, T5K10, T14K8, T30K4 y T5K12B (GOST).

Los carburos cementados de titanio – tantalio - tungsteno consisten de granos de solución sólida de carburos de titanio, tantalio y tungsteno y granos adicionales de carburos cementados de tungsteno. Los carburos cementados poseen una densidad de 9,5 - 15,1 g/cm³, una dureza de 87 - 92 HRA y muy alta resistencia al desgaste a altas temperaturas. Su capacidad térmica es de 50 - 60 % menor que el grado P18. La conductividad térmica del T15K6 es ≈ 13 % mayor que la del P18 y el grado BK8 considerablemente mayor hasta en un 200 %. Los grados más utilizados son TT7K12 y TT7K15 (GOST).

En la designación codificada de los carburos de tungsteno convencionales el dígito que aparece al final indica el contenido de cobalto en porciento. Ejemplo el grado BK8 contiene un 8 % de cobalto y un 92 % de carburo de tungsteno.

En el grupo de titanio - tungsteno la letra k y el dígito indican el contenido de cobalto y la letra T con su dígito el contenido de carburo de titanio.

La dureza de carburos cementados está determinada por la dureza propia de los carburos que contiene, cualquier incremento en dureza siempre conduce a una reducción en la ductibilidad. Los materiales en este caso se hacen frágiles y no resisten grandes esfuerzos de flexión y cortantes y especialmente no resisten impactos. Los carburos de tungsteno convencionales son más dúctiles y menos frágiles que los del tipo titanio - tungsteno. Este

es explicado por el hecho de que los últimos contienen una mayor cantidad de carburos de titanio libre, el cual es muy frágil (Boothroyd, 2002).

Para el maquinado del hierro fundido, donde la viruta es discontinua y provoca cargas pulsantes en la punta de la herramienta, se necesita material de herramienta más dúctil y por ello se emplean los de carburo de tungsteno convencional. Este tipo de material es empleado también en el maquinado de metales no ferrosos y aleaciones ligeras; además pueden ser empleados satisfactoriamente para el maquinado de gomas, plástico, fibras, vidrios, electrodos de carbono (Ramírez *et al.*, 2008).

Consideran Ginjaume y Torre (2005); Kalpakjian y Schmid (2008) que en el maquinado de aceros al carbono y aleados sin endurecer, cuando el centro de presión sobre la herramienta está desplazado hacia atrás, pues la viruta ejerce un esfuerzo abrasivo sobre la cara de la cuchilla, se justifica la utilización de carburos de titanio - tungsteno. No obstante entre los tres grupos de carburos cementados de acuerdo a sus propiedades mecánicas, puede establecerse otros grupos. Los del tipo BK pueden dividirse en:

Los más fuertes y dúctiles, pero con menos resistencia a la abrasión como el BK8 y BK6 (operación de desbaste del hierro fundido). Los menos rígidos y menos dúctiles pero con mayor resistencia al desgaste son los BK2 y BK3M (operación de maquinado fino del hierro fundido) puesto que si se tiene que remover virutas gruesas (de avances grandes) causa la falla de estos carburos.

Los BK3M, BK4, BK6M y BK8B son nuevos tipos de carburos cementados donde la letra M y B al final significan que el método de procesamiento da lugar a una estructura de granos finos o a una de granos muy gruesos. El BK4 se utiliza tanto para desgaste como para el acabado del hierro fundido.

Los del tipo TK pueden dividirse en: el más rígido, pero menos resistente al desgaste, T5K10 (desbaste de aceros con cortes interrumpidos grandes avances y virutas de sección no uniforme). Menos rígido, pero más resistente al desgaste, T14K8 y T15K6 (semiacabado, avances medios, secciones de viruta y cortes continuos). El más frágil, pero el más resistente al desgaste, T30K4 (operación de acabado el acero con avances pequeños, cortes uniformes y alta velocidad de corte).

La alta dureza, resistencia en caliente y resistencia al desgaste de estos materiales es combinada con una baja resistencia a la flexión de $90 \text{ a } 155 \text{ kgf/mm}^2 \approx 900 \text{ a } 1550 \text{ MPa}$ es decir de 33 a 55 % menos que la del acero rápido; además muy baja resistencia al impacto. Esto hace necesario que las herramientas sean diseñadas de forma que trabajen a compresión y que su resistencia a la compresión es de $500 \text{ kgf/mm}^2 \approx 5000 \text{ MPa}$, de 30 a 50 % mayor que los HSS de Titanio - Tungsteno por su mayor dureza y alta resistencia al desgaste, no obstante su menor ductilidad (Kalpakjian y Schmid, 2008).

En los carburos cementados presentan una dureza comparativamente alta y es mantenida inclusive cuando son sometidos a temperaturas del orden de $800 - 900^\circ\text{C}$, por esto las herramientas calzadas con estos materiales tienen una alta resistencia al desgaste, lo cual permite realizar el maquinado a velocidad de corte considerablemente elevadas, lo que incrementa sus posibilidades (Childs, 2006).

1.3.1. Parámetros microestructurales de los compuestos de carburo

Los parámetros microestructurales como, fracción de volumen de cada fase, tamaño promedio de las partículas de carburos, camino libre medio del aglomerante y adherencia de la fase de carburo han sido utilizados para caracterizar la microestructura y correlacionar las propiedades mecánicas de los compuestos de WC - Co (Christensen y Wahnstron 2006, Kim *et al.*, 2006, Hussainova, 2005, Luyckx *et al.* 2006).

Convencionalmente, estos parámetros microestructurales han sido caracterizados por una combinación de análisis lineal y puntual, denominado método del intercepto lineal, sobre micrografías obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) (Gurland 1984, Underwood 1992 y Shatov *et al.* 2006).

Como en otros materiales de ingeniería, el efecto cualitativo del tamaño de partícula sobre el comportamiento de los materiales está bien establecido. Los grados de WC - Co de grano fino presentan una alta dureza y baja tenacidad de fractura y los grados de grano grueso producen una baja dureza y alta tenacidad. La adherencia (C) de la fase de carburo, definida como la relación del área interfacial carburo/carburo al área interfacial total, influye considerablemente en las propiedades de los compuestos, particularmente, si las fases constituyentes difieren significativamente (He y Schoenung, 2002).

Eigen *et al.* (2005) plantea que por definición, la adherencia puede variar entre 0 y 1, a medida que la distribución de la fase de carburo cambia desde una microestructura en la fase líquida totalmente dispersada a una completamente aglomerada. La magnitud de la adherencia está principalmente determinada por las fracciones de volumen de las fases presentes. Por lo tanto, el efecto de la adherencia sobre las propiedades mecánicas de dureza y tenacidad de fractura tiene un efecto similar al de la fracción de volumen de carburo, es decir a medida que la adherencia aumenta la dureza incrementa y la tenacidad de fractura disminuye.

Los estudios de modelaje por MEF de la relación entre la adherencia y la resistencia de los compuestos de WC-Co ha sido presentada recientemente por Kim *et al.* (2006), que indicaron que los compuestos con mínima adherencia contenían partículas altamente angulares y granos de carburo equiaxiales con una estrecha distribución de tamaño, esta condición provee la mayor resistencia al carburo cementado.

1.4. Herramientas recubiertas

En la continua evolución de las herramientas de corte, surgen las herramientas recubiertas, con el objetivo de solventar los problemas que se generan con la abrasión y las reacciones químicas entre el material de la pieza a mecanizar y la herramienta de corte cuando ambas alcanzan elevadas temperaturas, de aumentar las velocidades de corte para ahorrar costos. Las herramientas recubiertas se componen de un sustrato o material del cuerpo de la herramienta, responsable de dar la resistencia necesaria a la misma y un recubrimiento que es el encargado de aportar las propiedades exigidas, como disminuir la fricción, aumentar la adhesión, conseguir una mayor resistencia al desgaste y mayor dureza en caliente así como una mayor resistencia ante los impactos. En la figura 1.3 se puede observar esta estructura (Tong *et al.*, 2009).

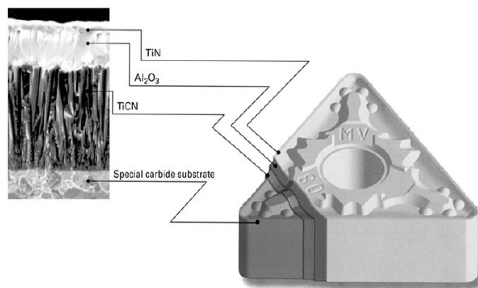


Figura 1.3. Estructura de las herramientas recubiertas.

Criterios de autores como Hernández - González *et al.* (2010) que los llamados insertos, son los que se montan en portaherramientas de diseños especiales, donde se alojan y van retenidas mediante diferentes tipos de fijación mecánica (figura 1.3). Estos insertos presentan una variedad de formas, tamaños, ángulos de filos y radio de punta adecuados para trabajos diversos. Presentan un filo activo por cada lado de su forma poligonal, en una sola cara o en ambas. También los hay de forma circular. Una vez agotados todos los filos, el inserto es descartado. Se emplean en torneado, fresado y taladrado.

Dentro de las herramientas recubiertas según Zhong (2011), se emplean los materiales cerámicos, materiales obtenidos por proceso de sinterizado a 1 700 °C de polvos de óxidos de aluminio o de nitruro de silicio entre 90 y 99 % y adiciones de otros óxidos como el óxido de circonio, de cromo, de magnesio, de hierro, donde el más común es el óxido de aluminio (Al_2O_3). Las características que lo hacen adecuado para el recubrimiento son: neutralidad química, baja conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas, resistencia al desgaste tanto del flanco como de cráter. La limitación está dada en que la estabilidad química de los óxidos provoca que en general se adhieran débilmente al sustrato.

Normalmente los cerámicos deben trabajar con ángulo de ataque negativo para que el esfuerzo sobre la herramienta sea netamente de compresión evitando sollicitaciones de flexión que den lugar a componentes de tracción. Lo mismo que el metal duro, estas herramientas se proveen en forma de insertos que se montan sobre portaherramientas. Pueden operar con velocidades de corte más altas que el metal duro, pudiendo superar los 1000m/min en casos especiales (Dawson y Kurfess, 2008).

Upadhyaya (2001) es del criterio que la aplicación del metal duro se extiende cada día más a herramientas que fueron siempre de dominio casi exclusivo de los aceros rápidos, como brocas, fresas pequeñas, machos, en las que todo el volumen está constituido por metal duro; son las herramientas de metal duro integral. La adopción masiva de estos materiales se alcanzó después de haber superado serios escollos, entre otros su fragilidad, y las fallas de soldadura de las plaquitas sobre las barras soporte. La fragilidad disminuyó con el perfeccionamiento de las técnicas de prensado, al igual que la seguridad de las soldaduras.

El uso de plaquitas soldadas ha disminuido aunque se emplea aún en herramientas para mecanizado en serie industrial como: brocas de cañón, cabezas de taladrar descartables, brocas delta (Sandvik) y para mampostería, herramientas de torno para baja producción.

1.5. Soldadura de insertos de carburo en la fabricación de herramientas

Estos materiales, conocidos vulgarmente como “widia” (del alemán, wie diamant, como el diamante), son compuestos de carburos de W o de Tantalio (Ta) y W e incluso de carburos de Ti y Nb (niobio), aglomerados comúnmente con Co. También se los conoce con el nombre de metales duros. Los carburos aportan la dureza necesaria mientras que el Co cumple la función de aglutinante (Zhong, 2011).

De acuerdo con Zhong (2011), en la escala Rockwell C, las diferentes variedades de carburos alcanzan valores entre 78 y 82. Su elevada dureza se debe a que los carburos son fabricados con metales refractarios, es decir, de alto punto de fusión. Los carburos no admiten ningún tratamiento térmico.

En la fabricación de herramientas de corte para mecanizar materiales en condiciones adversas de corte se requiere que el sistema de sujeción del inserto de carburo de tungsteno mantenga la integridad y robustez durante el corte. El proceso de unión por soldadura fuerte (*brazing*) permite la unión de insertos de carburo de tungsteno con portaherramientas de acero de medio carbono (figura 1.4) debido a que estos no compartan las mismas propiedades físico - químicas; esta unión de materiales cerámicos con metales es una combinación de propiedades que se complementan entre sí para superar el desempeño y las capacidades técnicas de una herramienta de corte conformada de un solo material (Coy, 1992; Galvery y Marlow, 2009).



Figura 1.4. Soldadura de inserto con llama oxiacetilénica.

De acuerdo con Montes *et al.* (2009), actualmente el proceso de unión de insertos de carburo de tungsteno al cuerpo de la herramienta de corte, se realiza mediante el proceso de soldadura fuerte, usando la técnica de gases combustibles (oxígeno + propano, oxígeno + acetileno u otros gases combustibles), con la utilización de un equipo de soldadura autógena; por costos resulta ser uno de los procesos más ventajosos, ya que es el que menor inversión económica requiere, es una técnica versátil y de fácil mantenimiento; pero se presentan problemas de calidad en la unión que es necesario estudiar y que en la mayoría de los casos reduce la expectativa de vida de la herramienta de corte o se pierde esta por completo, sin contar si es requerido un reproceso posterior por la interrupción del corte de material o se rechaza la pieza parcialmente mecanizada.

La fabricación se inicia con la preparación del cuerpo portaherramienta de acero al carbono a través de mecanizado y posteriormente se realiza la preparación del material de aporte, para finalmente realizar la unión por soldadura fuerte (*brazing*). En este proceso se encuentran problemas relacionados con baja adherencia, burbujas cautivas en la solidificación del charco de aleación metálica y errores de posicionamiento del inserto en el cuerpo portaherramienta; a causa de esto se inducen fallas en la unión tales como desprendimiento y fractura del inserto.

La selección del inserto se realiza conforme a las necesidades que se requieran en el proceso tecnológico, ello incluye: tipo de operación a realizar, parámetros de corte, material de la pieza a maquinar, máquina herramienta, acabado superficial (redondeamiento en la punta o radio de la nariz), forma de la pieza. En la figura 1.5 se muestra el proceso de preparación del material para la soldadura del inserto.



Figura 1.5. Preparación del material para la soldadura del inserto.

Según Walker y Hodges (2008) y Stroppa *et al.* (2010) el problema principal se encuentra durante el proceso de soldadura fuerte entre el inserto de carburo de tungsteno

y el portaherramienta (cuerpo) de acero al medio carbono, específicamente en la interfaz de la aleación metálica de aporte y el acero al medio carbono; la gran mayoría de los desprendimientos de los insertos suceden por discontinuidades o defectos durante el proceso de soldadura (poros, burbujas, grietas) ya que estos son concentradores de esfuerzos, que se localizan principalmente hacia la interfaz con el portaherramienta de acero al medio carbono a causa de la alta velocidad con que se transfiere el flujo de calor por parte del acero al medio carbono hacia el aire atmosférico, zonas con solidificación heterogénea y anisotrópica a causa del enfriamiento parcializado del charco de la aleación metálica.

Según Godoy y Diniz (2011), la fabricación se enfoca a la anterior interfaz descrita, ya que en esta zona es donde se presentan las mayores complicaciones técnicas y económicas de este tipo de unión epitaxial, desde el punto de vista técnico no se tienen los montajes adecuados para la sujeción de materiales duro - cerámicos en las mordazas, las geometrías restringidas que se pueden realizar en una lámina de carburo de tungsteno, el corte y conformado de la geometría para la realización de la probeta.

Las ruedas diamantadas abrasivas, el cuidado y manipulación durante el montaje en la máquina de ensayos mecánicos y desde el punto de vista económico tanto los materiales como los procesos fabriles que se realicen con metales duros, cerámicos o carburos son en su gran mayoría de mayor costo que los comparados con metales (seguridad personal, mayor riesgo y exposición a sustancias tóxicas, requieren mayor conocimiento y destreza técnica) (Groover, 2007).

Por otra parte plantean también Gurdial *et al.* (2006) que se presenta también las situaciones que el inserto o los insertos de carburo de tungsteno se fracturen por causas ajenas al proceso de soldadura y que están asociadas a uso y manipulación de las herramientas de corte como son: las sobrecargas en la cantidad de material a remover, los choques súbitos de la herramienta (manipulación y manejo inadecuado, errores de atención) por parte del operario, los mecanizados discontinuos e intermitentes (choques cíclicos y aceleraciones pico - súbitas), el desgaste de las aristas de corte (no corta fácilmente, desgarrar por fractura plástica del material) o por la combinación de dos o más situaciones anteriores.

1.5.1. Parámetros a considerar en la soldadura de insertos en herramientas de corte

Los aceros para herramientas presentan determinadas características metalúrgicas que son necesarias a tener en cuenta a la hora de establecer un procedimiento para su soldadura (Maining, 1983; Olson *et al.*, 1992). Debido a que ellos generalmente contienen al menos 0,6 % de carbono, para proveer dureza martensítica, esto provoca que posean una dureza mínima de 60 HRc. El carbono en exceso de la composición eutectoide va a estar presente en los aceros como carburos insolubles en la matriz martensítica. Algunos tipos de aceros para herramientas contienen menos por ciento de carbono para proveer tenacidad y resistencia al impacto.

En la fijación de insertos se han planteado diferentes enfoques de investigación, entre los más comunes son las técnicas de unión adhesiva (Darwish, 1998), el enfoque dado por el autor es la influencia del método de unión con el acabado superficial de una pieza mecanizada. El inserto fijado por unión de soldadura fuerte presenta inconvenientes debidos a la diferencia de dilatación térmica entre los materiales a unir los que genera desplazamientos y tensiones residuales en la unión, degradación cristalina en el inserto de metal duro. La ventaja de la técnica por soldadura fuerte es la elevada resistencia que presenta la unión ante mecanizados intermitentes y discontinuos, la alta exactitud dimensional bajo rigurosas tolerancias geométricas.

En los trabajos de investigación dirigidos hacia la unión de materiales por soldaduras fuertes (Extrand, 2003) indica que el ángulo de contacto entre la superficie del metal líquido y la superficie sólida es fundamental obtener las características de calidad deseadas en la unión por fusión mediante la técnica de soldadura fuerte, además cabe resaltar que el ángulo de contacto es la afinidad química que existe entre las superficies de un líquido y un sólido; por tal razón son dependientes de la tensión superficial, la densidad y temperatura de fusión del material de aporte, la rugosidad de la superficie sólida y las condiciones necesarias de la atmósfera inerte para realizar la soldadura, por tanto, las anteriores son algunos de los parámetros relevantes en la obtención de las características de calidad deseadas en la unión.

Las fuerzas que resultan de una unión entre un metal líquido y superficies metálicas sólidas son las que están presentes en la cohesión de la estructura cristalina sólida, es decir, las fuerzas de atracción entre sus átomos constitutivos; por tanto, las fuerzas de

atracción entre la superficie adhesiva y las superficies de los metales base tienen una interacción física denominada fuerzas de Van Der Waals (fuerzas de estabilización físico química debidas a las fuerzas de cohesión y repulsión molecular), Las fuerzas de atracción se incrementan proporcionalmente a su separación hasta cierto punto, donde la fragilidad del sólido alcanza su máximo valor y comienza a decrecer.

Para diferenciar las fases de fluidos se designa interfaz o superficie de Gibbs para la superficie imaginaria de separación de fases y para el volumen de intersección y transición de las tres fases se nombra interfase (Montes, 2009). En la figura 1.6 se muestra el esquema de una interfaz y una interfase.

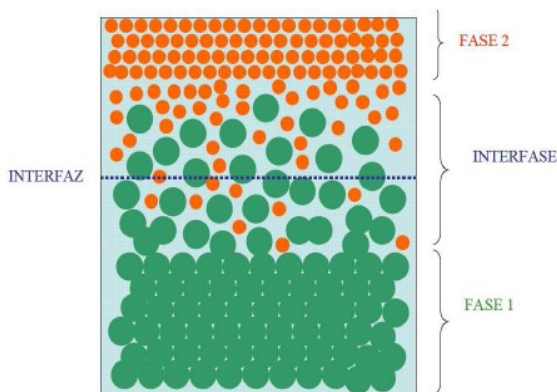


Figura 1.6. Esquema de un interfaz y una interfase. Fuente: Montes (2009).

En superficies reales los aspectos de la rugosidad, la anisotropía, la heterogeneidad química, la variedad de ángulos de contacto (MAC), los ángulos de equilibrio metaestable, ACA y ACR y demás variables son poco reproducibles bajo los efectos de campos externos al sistema termodinámico de mojado y capilaridad entre las superficies y las interfases.

Montes (2009) expone que el sistema de mojado es un sistema termodinámico de tres fases; una fase fluida que puede ser un vapor, un gas o un líquido, una fase líquida y una fase sólida. La región de separación se denomina interfase, que es un volumen de espesor de varias moléculas que ha sido delimitada por simplicidad como una superficie de manera ideal, pero en realidad lo que existe es un volumen de transición gradual entre fases de forma continua y no discreta.

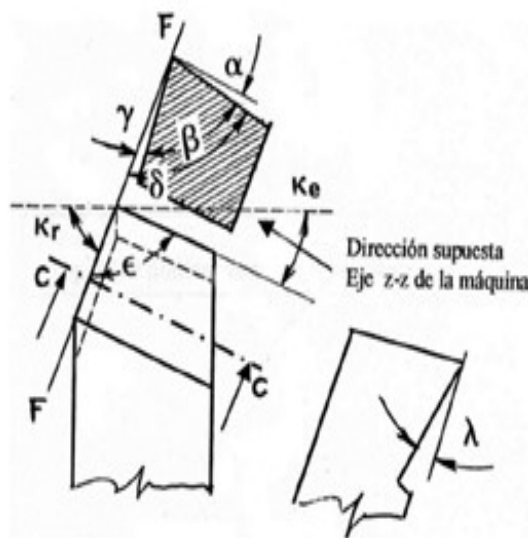
De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2006), la mojabilidad es la capacidad física de un determinado líquido de extenderse y dejar una traza sobre una superficie sólida; su

magnitud física accesible experimentalmente es el ángulo de contacto, que mediante la ecuación de Young expresa la relación entre las tensiones interfaciales del sistema de mojado con el ángulo de contacto ideal.

La multiplicidad de los ángulos de contacto establecido en los procesos de soldadura de insertos metálicos es la consecuencia entre el predominio de la heterogeneidad química o el predominio de la rugosidad en un sistema de tres fases. En caso de superficies cuasi - lisas y heterogéneas, la MAC se debe varios ángulos intrínsecos sobre la línea de contacto originados por las diferencias químicas (dispersión de características químico metalúrgicas) presentes en la superficie; en superficies cuasi - homogéneas químicamente pero rugosas, la MAC se debe por la existencia de inclinaciones locales (pendientes topográficas) de la superficie respecto al nivel horizontal al perímetro de la línea de contacto de tres fases.

1.5.2. Geometría de la herramienta de corte

La forma básica de la herramienta de corte es una cuña, con dos superficies planas que delimitan un ángulo diedro (figura 1.7). La forma principal de ataque es con la arista común paralela a la pieza. La arista común es la arista de corte principal o filo. Es la línea donde se produce el corte principal de la pieza en cuanto hay un avance longitudinal, es decir frontal a la pieza. La superficie de incidencia principal es la cara de la cuña que queda frente a la superficie trabajada de la pieza en corte frontal.



- α - ángulo de ataque,
- β - ángulo de cuña,
- γ - ángulo de incidencia,
- λ - ángulo de inclinación del filo,
- ε - ángulo de la punta,
- K_r - ángulo de posición (frontal del filo ppal),
- K_e - ángulo frontal del filo secundario,
- δ - ángulo de corte.

Figura 1.7. Geometría de la herramienta de corte.

La superficie de desprendimiento o de ataque es la otra cara de la cuña, por donde la viruta que se forma al producirse el corte se desprende de la pieza. Generalmente la viruta desliza por esta superficie antes de desprenderse. Cuando se produce un avance transversal el contacto se genera en el lateral de la pieza de corte con lo que tenemos la arista de corte secundaria o contrafilo: Es la arista por donde se corta cuando hay un avance transversal y la superficie de incidencia secundaria, la cara que avanza perpendicularmente con el avance transversal.

La geometría de las herramientas de corte se puede describir por medio de diferentes ángulos: Si consideramos la normal y la tangente a la pieza obtenemos un ángulo recto. Dentro de este ángulo esta herramienta. El ángulo de la cuña, herramienta, recibe el nombre de ángulo de filo o de hoja y se denota por β . El ángulo que queda entre la superficie de incidencia principal y la tangente a la pieza recibe el nombre de ángulo de incidencia y se denota por α . Y el ángulo de queda entre la superficie de desprendimiento recibe el nombre de ángulo de desprendimiento o de ataque y se denota por γ . Este último puede ser negativo, lo que significa que la superficie de desprendimiento va más allá de la normal y se mide hacia es otro lado. Con esta convención la suma de los tres es siempre 90° .

1.6. Soldadura fuerte por antorcha o soplete

En la actualidad la soldadura es uno de los procesos más ampliamente usados para fabricación y reparación de diversos equipos en todo el campo de la ingeniería, por ello es de gran interés incrementar la calidad y prevenir fallas durante la fabricación o en servicio, para lo cual es necesario obtener información acerca de la forma, dimensiones y tensiones residuales (Kumar, 2014).

La soldadura con gases combustibles es denominada por la American Welding Society como OFW (*oxyfuel welding* en inglés) y cuando se emplea acetileno como gas combustible se denomina OAW (*oxyacetylene welding*), lo cual es solo uno de los múltiples tipos que conforman la soldadura fuerte con gases combustibles.

La generación de calor con gases combustibles contenidos a presión tiene uso en ciertas especialidades industriales como por ejemplo: corte, tratamientos térmicos (temple energético, recocido y revenido parciales, alivio de tensiones) doblado, precalentamiento,

soldadura blanda (*soldering*) y soldadura fuerte (*brazing*) de metales, cerámicos y aleaciones, debido al control preciso de la flama, a la versatilidad para el manejo y transporte del equipo, lo constituyen en un equipo indispensable en la industria actual.

En la figura 1.8 se muestra el proceso de soldadura oxiacetilénica.

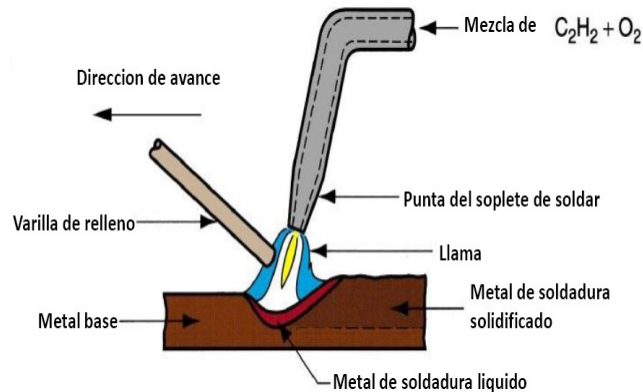


Figura 1.8. Proceso de soldadura oxiacetilénica.

El calentamiento se realiza mediante una combustión de gases utilizando una antorcha ó soplete que regula el flujo de los gases. El tamaño de las piezas y la temperatura de fusión de los materiales de aporte determinan la elección del gas combustible tales como: acetileno, propano, metano, metilacetino - propadieno estabilizado, hidrógeno y si estos se van a quemar con oxígeno a presión, aire comprimido o aire atmosférico (Kuk *et al.*, 2004; Pakandam y Varvani, 2011).

La aplicación de los fundentes en los materiales de aporte se puede realizar previamente en la unión por vía húmeda en pasta; este método es muy versátil debido a que se puede soldar ensambles de piezas de masas y dimensiones diferentes, debido a que la soldadura se efectúa por calentamiento localizado (parcial) de los materiales de aporte, por lo que es la técnica de soldadura fuerte más utilizada (SOLDEXA, 2011).

Según Kalpakjian y Schmid (2008) el proceso OAW (Soldadura oxiacetilénica), es el más importante y el más utilizado en la práctica industrial, brinda entre sus propiedades la llama más caliente y más concentrada de todos los gases industriales, pues puede alcanzar una temperatura promedio de hasta 3 200 °C, facilitando por esta razón, el proceso de soldadura por fusión, fundamentalmente cuando aumentan los espesores de las chapas a soldar.

1.6.1. Tipos de llamas en la soldadura oxiacetilénica

En los procesos de oxigas la fuente de energía calorífica para lograr la soldadura por fusión de los materiales, la constituye una llama que se obtiene como resultado de la reacción química durante la combinación o mezcla de un gas combustible y un gas carburante (oxígeno). Esta reacción es fuertemente exotérmica y la llama a que da lugar, que se dirige, mediante un soplete, a los bordes de la pieza a unir, provoca su fusión y soldadura (Kuk *et al.*, 2004).

Según Pástor (2006), la llama oxiacetilénica, en dependencia de la proporción de oxígeno y acetileno que la conforma puede ser de tres tipos: neutra o normal, cuando el contenido de oxígeno y acetileno es aproximadamente el mismo; oxidante, cuando la proporción de oxígeno es mayor en 1,3 veces la de acetileno y carburante, cuando ocurre lo contrario. En la figura 1.9 se muestran los diferentes tipos de llamas, se diferencian entre sí por su forma, tamaño, colores y sonidos, resultando relativamente fácil su identificación.

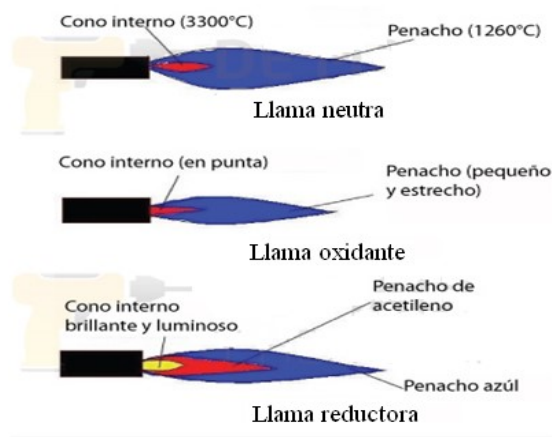


Figura 1.9. Tipos de llamas empleadas en la soldadura oxiacetilénica.

Plantea Pyttel *et al.* (2012) que la soldadura fuerte se realiza mediante la técnica de generación y transferencia de calor por gases combustibles en proporciones estequiometrias según el volumen de la cámara de mezclado de gases del soplete se denomina flama neutra (combustión completa). La mezcla de gases de oxígeno y acetileno pueden producir una flama con una temperatura de 3 090 °C en la punta de la boquilla del soplete, con propano produce una temperatura en la flama de 2 200 °C; esta flama funde el metal de aporte que proviene de láminas o varillas de soldar formando un charco de metal líquido que moja las superficies que se quieren unir y luego se solidifica

el metal líquido conformando un cuerpo epitaxial de propiedades mecánicas solidarias cercanas a un cuerpo rígido.

Sobolev *et al.* (2004) plantea que la unión se obtiene principalmente mediante la combinación de tres efectos:

Humectación o mojabilidad

Es la capacidad de un líquido para mojar un sólido, que le permite fluir sobre él y formar una película; es el fenómeno que permite que una fina película de agua quede adherida a la superficie de un vidrio cuando se escurre una gota. En la soldadura fuerte, este efecto se identifica como la fluidez del metal de aporte sobre las superficies caliente.

Capilaridad

Es un conjunto de fenómenos físicos que ejerce presión sobre los líquidos y hace que penetren entre dos superficies muy próximas entre sí. En la soldadura fuerte, la capilaridad hace que el metal de aporte llene el huelgo entre las piezas a unir. Este huelgo debe ser, como máximo de 0,08 mm para la soldadura fuerte con atmósfera controlada y de 0,08 a 0,40 mm para la soldadura fuerte con atmósfera no controlada.

Difusión molecular

Es un proceso espontáneo de transporte de moléculas del sistema cristalino de un material al otro. Al calentarse, las moléculas del material base se distancian y el metal de aporte en estado líquido penetra entre ellas. Al enfriarse, las moléculas se atraen y contraen el metal de aporte, produciendo la adhesión entre el metal base y el metal de aporte. Para que todos estos efectos tengan lugar de forma satisfactoria, se deben observar algunas características fundamentales de las uniones: las partes a unir deben estar perfectamente limpias, libres de aceite, grasa, polvo, pintura, óxido o desecho de cualquier tipo; la distancia entre ellas debe estar dentro del rango especificado para el método de calentamiento aplicado; el metal de aporte y el fundente deben ser adecuados a la aleación de los materiales base a unir (Galvery *et al.*, 2009).

Según el criterio de Montes (2009) cuando el oxígeno y el gas combustible se combinan en proporciones cercanas a las estequiométricas en la cámara de mezclado del mango del soplete, lo cual permite la obtención de flama a temperatura mayor que la temperatura de fusión del material de aporte, por lo general este material de aporte es una metal aleado



que alcanza la fase líquida sobre las superficies de los materiales base y cuando este material se solidifica estos materiales base se configuran como un material sólido en varias capas (epitaxial).

La mayoría de las técnicas de soldadura fuerte (*Brazing*), soldadura blanda (*Soldering*) y unión adhesiva (*Adhesive Bonding*) emplean un material externo adicional (material de aporte) que actúa como puente entre las superficies de diferentes materiales a los cuales se les desea hacer la unión (Sindo, 2002).

En el proceso de soldado los átomos del material de aporte en fase líquida son atraídos más intensamente por los átomos del material base que por los de su propio material; a esta fuerza de atracción se le denomina adhesión y la preferencia de los átomos ajenos provoca la acción de mojado del material base y cuando esto ocurre en placas paralelas muy cercanas se evidencia que la capilaridad del material de aporte líquido es más fuerte de que la fuerza de gravedad, esto favorece la unión debido a que este metal líquido se distribuye homogéneamente por las superficies (Kear *et al.*, 2001).



1.7. Conclusiones del capítulo 1

- En los procesos de maquinado por arranque de virutas se emplean cuchillas monofilas de carburos de tungsteno o carburo sinterizado, las primeras son unidas al mango por proceso de soldadura, la segunda son del tipo intercambiable con sujeción mecánica.
- Para lograr la unión metalúrgica entre el mango de la cuchilla, fabricado de acero de medio contenido de carbono y el carburo de tungsteno del tipo TK o BK, se emplea el proceso de soldadura oxiacetilénica donde debe cumplir que existan tres condiciones: humectación o mojabilidad, capilaridad y difusión molecular.
- Se pudo establecer que en el proceso de soldadura oxiacetilénica se emplean tres tipos de llama; la oxidante, la carburante y la neutra, pero para realizar el proceso de soldadura en los insertos metálicos se debe emplear esta última.

Capítulo 2

Materiales y métodos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Para desprender partículas metálicas de una pieza en bruto es necesario que la herramienta de corte penetre en el material a cortar. Esto es posible si se aplica la suficiente fuerza a la herramienta y si el material de la herramienta es más duro que el material a cortar. La herramienta, además, debe ser lo suficientemente resistente para soportar las cargas generadas por el corte. Además, el movimiento relativo entre la herramienta y el componente en el proceso de corte y especialmente sus elementos cortantes que están en contacto directo con el material a cortar están sometidos a muy altas tensiones, mucha fusión y calentamiento.

En este capítulo se plantea como objetivo establecer la metodología relacionada con la preparación de muestras, así como la relación de máquinas y equipos a emplear en el proceso de depósitos de soldadura en las cuchillas TK para la inserción de plaquitas.

2.2. Geometría de corte de la herramienta monofilo

Para estudiar la geometría de la herramienta se considera el sistema de la recomendación ISO/DIS 3002. Esta norma establece un sistema de planos a partir de los cuales se van a definir los ángulos de corte. La norma distingue entre geometría herramienta en mano y geometría herramienta en uso. El primer sistema se usa con fines de fabricación y afilado de herramientas, mientras que el segundo se define cuando la herramienta está realmente en el proceso de corte. En la figura 2.1 se muestra la geometría de corte de la cuchilla.

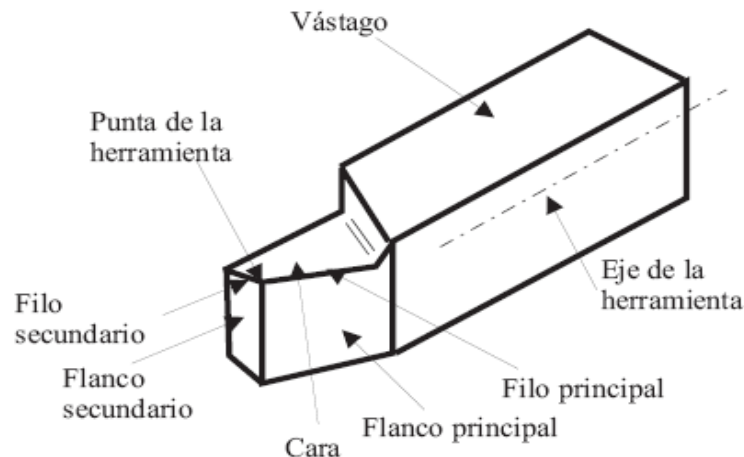


Figura 2.1. Nomenclatura en una herramienta de torneado

Esta es una forma de tener en cuenta los efectos de los grandes avances y los posicionamientos de las herramientas en las máquinas de acuerdo con los distintos normalizados. Lo único que puede distinguir un sistema de otro es la dirección de la velocidad resultante y la dirección de la sujeción en el montaje.

La interacción entre la herramienta, la viruta y la pieza, se traduce en una serie de presiones sobre la superficie de la herramienta. Este sistema de fuerzas y presiones se puede reducir a una fuerza resultante. El momento resultante se puede despreciar ya que el área sobre el que se aplica la fuerza es muy pequeña.

2.3. Características del material de la plaquita

El carburo de wolframio o carburo de tungsteno es un compuesto formado por wolframio y carbono. Debido a su elevada dureza y escasa ductilidad, se elaboran piezas de este material en forma de polvo, se añade entre un 6 y un 10 % de cobalto. Los granos del carburo de wolframio empleados en el proceso suelen tener diámetros de 0,5 a 1 μm aproximadamente.

El carburo de wolframio tiene una densidad de $14,95 \text{ g/cm}^3$. Un alto punto de fusión a $2\ 870\ ^\circ\text{C}$, un punto de ebullición de $6\ 000\ ^\circ\text{C}$ a 1 atmósfera estándar (100 kPa). Su conductividad térmica es de $84,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y su coeficiente de expansión térmica de $5,8 \mu\text{m.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Capacidad calórica: $200 - 480 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$. Es extremadamente duro, ocupa el grupo 9 en la escala de Mohs, número Vickers de 1 700 a 2 400. Tiene un módulo de Young de aproximadamente 550 GPa, un módulo de compresibilidad de 439 GPa y un módulo de cizalladura de 270 GPa. Su resistencia a la tracción es de 344,8 MPa y de 5 300 - 7 000 MPa de resistencia a compresión.

A pesar de presentar estas excelentes propiedades, si se somete a altas temperaturas, se cristaliza y pierde las mismas. Se les conoce con el nombre de carburos sinterizados (metal duro). Estos materiales, conocidos vulgarmente como “widia” (del alemán, wie diamant, como el diamante), son compuestos de carburos de W, o de Tantalio (Ta) y W, e incluso de carburos de Ti y Nb (niobio), aglomerados comúnmente con Co. También se los conoce con el nombre de metales duros. Los carburos aportan la dureza necesaria mientras que el Co cumple la función de aglutinante.

2.3.1. Material de aporte empleado en la soldadura

El material de aporte que se emplea para la soldadura se denomina "plata para montar pastillas de carburo de tungsteno", es una aleación especial UTP trifolie (UTP 305 Cu) en forma de lamina se utiliza para montar pastillas de carburo de tungsteno en zancos de acero no aleados o de baja aleación se utiliza especialmente cuando se trata de herramientas de corte relativamente grandes y, por lo tanto, sensibles a sufrir tensiones internas.

Su composición especial permite que las tensiones se reduzcan gradualmente después de soldar, sin que la pieza sufra consecuencias negativas. Adicciones de elementos de aleación especiales, hacen fluir la aleación por efecto capilar. La fuente de calor es a través de sopletes oxi-acetilenicos, horno, inducción de alta frecuencia. La composición química de la aleación es a base de Ag, Cu, Zn, Mn, Ni, se suministra en rollos laminados de 70 mm de ancho y 0,3 mm de espesor y para la soldadura se recomienda como fundente el AG – 3.

Las instrucciones para soldar con este material de aporte es limpiar el área para soldar. Aplicar fundente en las caras por unir entre el zanco y la pastilla de carburo, colocar la lamina de UTP trifolio previamente cortada a la medida, entre la pastilla de carburo y el asiento del zanco de acero, según el procedimiento de la figura 2.2.

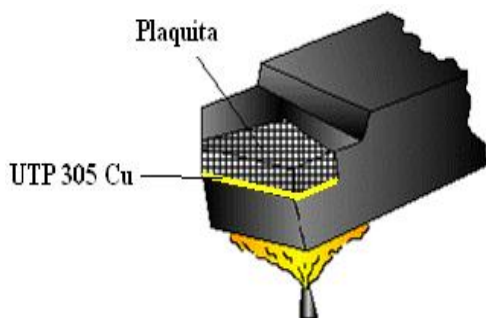


Figura 2.2. Procedimiento de soldadura de las cuchillas.

Se establece que se debe calentar desde el lado del zanco hasta que la aleación se funda por acción capilar y se efectúe una unión duradera. Al utilizar soplete de oxiacetileno, usar una boquilla grande, manteniendo el soplete en constante movimiento y concentrando el calor en el zanco. Sujetar la pastilla de carburo, ejerciendo ligera presión para mantenerla en posición. Dejar que la pieza se enfríe lentamente y limpiar los residuos de fundente. La llama a emplear es la neutra.

2.4. Plan experimental

La metalografía estudia las características estructurales y de constitución de los productos metalúrgicos con la ayuda del microscopio metalográfico, para relacionarlos con sus propiedades físicas y mecánicas. La preparación defectuosa de las probetas puede arrancar las inclusiones importantes, destruir los bordes de grano, revenir un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características de la aleación. Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10 - 56:86 y ASTM E3 - 95.

1. Selección de la muestra.
2. Toma o corte de la muestra.
3. Montaje y preparación de la probeta.
4. Ataque químico de la probeta.
5. Análisis microscópico.
6. Obtención de micrografías.

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon muestras de una cuchilla soldada por método convencional y otra realizada por proceso de soldadura oxiacetilénica, la denominación del tipo de plaquita es TK (carburo metálico). La figura 2.3 (a) se corresponde con la cuchilla soldada en atmósferas controladas y la 2.3 (b) es la vista de la cuchilla soldada por soldadura oxiacetilénica.

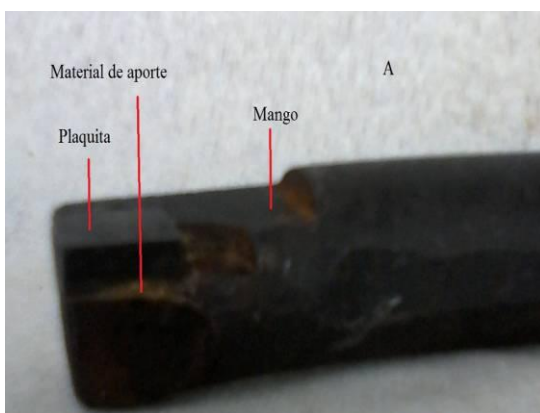


Figura 2.3 (a). Atmósfera controlada.

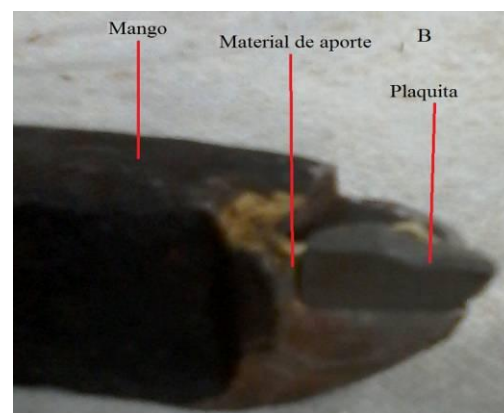


Figura 2.3 (b). Oxiacetilénica

Para el proceso de soldadura, se elige un mango porta placa, el cual, generalmente es de acero AISI 1045, al que por proceso de fresado se le realiza un vaciado para el alojamiento de la plaquita, la cual puede ser del tipo TK o BK.

El uso de plaquitas tiene una ventaja adicional. En las herramientas de un solo cuerpo, una vez se gasta el filo de corte hay que proceder a afilarlo, esto supone desmontar la herramienta, proceder a recuperar los filos de corte de la herramienta en los ángulos adecuados y un posterior montaje en la maquina. Esto lógicamente conlleva un tiempo elevado y por tanto un aumento del coste de producción.

2.4.1. Área para la selección de las muestras

La localización de la parte que va a ser estudiada se realizó de forma tal que la misma representara el sitio de selección en la pieza, que considera el sustrato que existe entre la plaquita y el mango de la cuchilla como se muestra en las figuras 2.4 (a) y 2.4 (b), donde se tuvo en cuenta el procedimiento descrito en la figura anterior con el tipo de soldadura. El tamaño adecuado de la probeta fue de forma tal que permitió sostenerse con la mano durante su preparación y en función del área de trabajo del microscopio a utilizar.



Figura 2.4 (a). Atmósfera controlada.



Figura 2.4 (b). Oxiacetilénica

Se seleccionó en cada caso la zona de la cuchilla en la que se depositó el metal de aporte que es fundamentalmente el área donde se origina el defecto. Esta se encuentra en el área comprendida entre la plaquita y el mango de la cuchilla.

2.4.2. Toma o corte de la muestra

Las dimensiones de la superficie a examinar se cortaron con una segueta de tal forma manual de manera que se pudiera aprovechar las zonas con un mayor espesor de soldadura para su fácil manipulación y posterior nivelación, así como el ataque químico. Para realizar el corte se retiró la plaquita del mango, en lo cual se utilizó un tornillo de banco para la sujeción de la cuchilla, luego con un martillo y un cincel sin filo se le dio un fuerte golpe en la parte inferior de la plaquita logrando su desprendimiento del mango.

Se procede al corte donde se encuentra el sustrato de las soldaduras como se observa en figura 2.5 (a) hasta lograr obtener la pepita del análisis, según la figura 2.5 (b), se trató en lo posible que las muestras fueran similares de cada cuchilla. En ambas soldadura, el corte se realizó de forma paralela al material depositado.

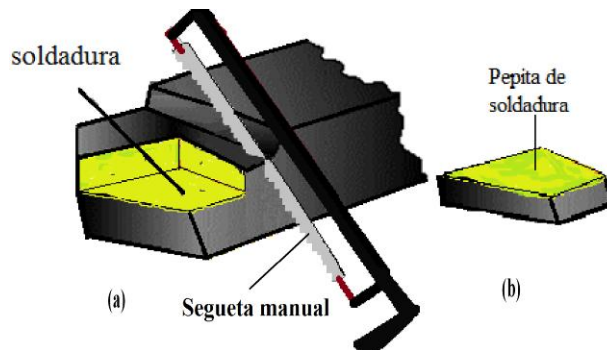


Figura 2.5 (a). Corte horizontal de la soldadura. 2.5 (b). Pepita de soldadura.

Para el análisis microestructural se prepararon con dimensiones de 15 x 15 según (Norma ASTM E 92), se cortaron con una sierra manual, sin refrigeración. Las dimensiones de la superficie a examinar varían en cada caso, es suficiente, siempre que sea posible, disponer de secciones mínimas de 10 x 10 mm y no mayores de 25 x 25 mm y con probetas con altura de 20 mm (Sturla, 1951).

2.4.3. Encapsulado de las muestras resina epoxi ROYAPOX – 5050

Las muestras se encapsularon para poder realizar las operaciones de desbaste y pulido y garantizar el fácil manejo de las mismas. Las figuras 2.6 (a) (soldadura controlada) y 2.6 (b) (soldadura oxiacetilénica), se corresponden con el proceso de encapsulado.



Figura 2.6 (a). Controlada.



Figura 2.6 (b). Oxiacetilénica

Cuando se va a realizar análisis microestructural en bordes de muestras deformadas, es importante conservar un ángulo de 90° en toda el área a observar, aspecto que no es posible,

de no realizarse esta operación, ya que durante las operaciones de desbaste y pulido, los bordes se distorsionan redondeándose, obteniéndose una falsa observación de la imagen. El encapsulado se realizó con resina epoxi ROYAPOX – 5050.

Se observa en ambas figuras que se ha logrado, mediante este procedimiento, mantener la geometría de las piezas, en un análisis macrográfico se revela la presencia de defecto como poros en la pepita de la soldadura oxiacetilénica.

2.4.4. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050

La resina epoxi ROYAPOX 5050 está compuesta por dos componentes y una vez polimerizada a temperatura ambiente, forma una masa incolora, dura y algo flexible. Presenta buenas cualidades de resistencia a la humedad y buenas propiedades mecánicas y dieléctricas que conserva sus propiedades a temperaturas comprendidas entre - 30 y 125 °C. Se suministra en dos componentes separados y predosificados: ROYAPOX 5050 y endurecedor 5050.

La relación de mezcla en peso (resina/endurecedor) es de 100/40 y puede utilizarse en la impregnación ó relleno de pequeños componentes electrónicos, que requieran una protección contra la humedad y los cambios de temperatura.

2.4.5. Proceso de desbaste y pulido

El desbaste a grandes rasgos, consistió en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. El pulido con los papeles abrasivos se realizó con la variación de la granulometría, desde la más gruesa a la más fina. Concluido el proceso de lijado fino, se realizó la operación conocida como pulido fino, en el que se empleó la pasta abrasiva conocida comercialmente como “Pasta GOI”, añadida sobre discos provistos de paños o motas. En el pulido se emplearon lijas del tipo No, 240, 320, 400, 600 y 1200 según (ISO 9001).

Este pulido se llevó a cabo manualmente con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° y limpiando la muestra con abundante agua y secándola con papel absorbente o aire caliente al pasar de un pliegue de lija a otro, de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

2.4.6. Lijado grueso y fino

Con el lijado grueso se redondearon los ángulos que podrían llegar a provocar la rotura del papel esmeril o del paño durante el pulido. Las primeras etapas de lijado se realizaron con papel de lija con tamaño de granos 240 y 320 respectivamente, para obtener una superficie plana, libre de toda distorsión o huellas producto del corte y además lograr que todas las marcas del lijado sigan una misma dirección. El lijado fino se realizó semejante al anterior, con la diferencia que esta vez el proceso se inició con lija de tamaño de granos 400 hasta 1 200. Cada vez que se cambió de lija se operó de la forma descrita anteriormente, a fin de obtener nuevas rayas perpendiculares a las anteriores.

Luego se pulió con el apoyo de la cara desbastada de la muestra sobre un paño untado con una suspensión acuosa de óxido de cromo el cual se aplicó sobre el disco de la pulidora, el paño utilizado fue de fieltro, esto se realizó para eliminar las rayas finas producidas en la última operación de lijado hasta que se consiguió una superficie sin rayas y con alto pulimento a espejo. Luego del pulido se lavaron con agua destilada, se secaron con papel de filtro y finalmente se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir y secada finalmente con aire seco y caliente.

2.4.7. Ataque de las muestras para su examen microscópico

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo espejo, para observar la estructura metalográfica formada después del proceso de desgaste (ASTM E - 262 - Practice A). Se realizó en el laboratorio de Tecnología de los Metales del ISMMM. En la tabla 2.1 se muestra la forma de preparación de los reactivos y en la figura 2.7 el ataque de las muestras.

Tabla 2.1. Reactivos químicos empleados y forma de preparación.

Material	Composición de los reactivos	Régimen de ataque químico
Bronce	10 g de cloruro férrico + 30 cc de ácido clorídrico + 120 cc de agua o alcohol.	Ataque químico bajo t 20 °C durabilidad de 20 s a un minuto.

La figura 2.7 se corresponde con el ataque de las muestras, el procedimiento que se empleó fue el de inmersión, se parte del hecho de que no se dispone de una muestra patrón que permita cuantificar los cambios microestructurales que puedan surgir durante la aplicación del reactivo.



Figura 2.7. Ataque químico de las muestras

El ataque se realizó por inmersión. Preparado el reactivo, se vertió en una cápsula en la que se introdujo la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detuvo el ataque con agua y se observó la superficie. La operación se repitió hasta que la superficie a examinar estuvo bien atacada. El tiempo de ataque fue variable y sólo la práctica o la observación repetida de la probeta al microscopio dirán cuando debe darse por terminado. Para la observación de las muestras por microscopia óptica las muestras fueron atacadas con el mismo reactivo ya que son del mismo material.

2.5. Equipos empleados en la experimentación

Se seleccionaron los equipos a emplear durante la experimentación, se consideró como una técnica avanzada y para la obtención de los resultados se necesita de una preparación más especial y cuidadosa de la muestra. Se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido el metal, debido a que los mismos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso. Como consecuencia de ello también es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas (dependiendo de los constituyentes metalográficos presentes en la estructura).

2.5.1. Observación con microscópica óptica

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM – 100, como se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100.

Este microscopio óptico está ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio y evitar una observación distorsionada de las imágenes, se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió la nivelación adecuada de las muestras.

2.5.2. Ensayos de microdureza

En este trabajo se ha utilizado el procedimiento de dureza Vickers (Callister, 2000; Askerland, 1998). Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT - 3 No 168, del Laboratorio de microscopia de minas del ISMM Moa, como se muestra en la figura 2.9

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó el ensayo para una carga de 10 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante penetrada en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para tres puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie de las probetas.



Figura 2.9. Microscopio metalográfico para medición de microdureza.

2.5.3. Pulidora metalográfica Montasupal

Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con papeles abrasivos del tipo 100, 120, 150, 180, 220 y 280, las características de la máquina son:

Voltaje	250 V
Corriente	2,5 A
Número de revoluciones	300 - 1 000 rev/min
Potencia del motor	3,72 kW

2.6. Calculo de factibilidad entre los procesos de soldadura

La búsqueda de alternativa, entre la compra y fabricación de herramientas en nuestro país, es una disyuntiva en la cual algunas empresas han tratado de suplir. Fundamentalmente en lo relacionado con las cuchillas de corte. Vidal y López (1998) muestran la factibilidad técnico-económica de fabricación en el país de los soportes portaplaquitas o mangos, que constituyen el elemento más costoso de estas herramientas. Es decir, se dispone de elementos que permiten considerar el empleo de estas herramientas en máquinas convencionales, siempre y cuando la fabricación reúna los requisitos establecidos por las normas. El costo de maquinado por pieza y por herramienta puede determinarse por la siguiente expresión:

$$C_p = t_t \left(\frac{S_h + S_m}{60} \right) + \frac{t_c}{T} C_{ft} \quad (2.1)$$

Donde:

C_p - costo del maquinado por pieza y por herramienta; \$/p-herram

S_h - salario del operario; \$/hora

S_m - costo del tiempo - máquina [\$ / hora]

t_c - tiempo de maquinado [min]

T - tiempo de vida útil del filo [min]

C_{ft} - costo por filo de la herramienta [\$ / filo]

t_t - tiempo unitario de la elaboración [min]

$$t_t = t_c + t_i + \left[\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right] t_{ft} \quad (2.2)$$

t_i - tiempo auxiliar [min]

Z - cantidad de piezas en el lote

t_{ft} - tiempo de sustitución del filo [min]

Como puede apreciarse, sólo los términos T , C_{ft} y t_{ft} son diferentes para cada tipo de herramienta. Por tanto, el análisis puede referirse sólo a estos términos y entonces la expresión (2.2) se transforma como sigue:

$$C'_p = \frac{t_c}{T} [t_{ft} + C_{ft}] \quad (2.3)$$

La expresión (3) no representa realmente el costo del maquinado, sino sólo la parte de éste que está afectada por el empleo de un tipo u otro de herramienta; por esta razón se ha designado mediante el símbolo C'_p . Esta expresión es el modelo matemático que permite hacer el análisis comparativo entre los dos tipos de cuchillas, para lo cual se hace necesario determinar los términos que en ella están presentes.

A continuación se exponen las consideraciones a tener en cuenta para la evaluación de cada uno de los términos:

- Tiempo de maquinado (t_c)

Se sugiere tomarlo numéricamente igual al tiempo de vida útil para el cual se calculará el régimen de corte (V) de la cuchilla con la plaquita soldada, para que el resultado del análisis quede referido por filo de la herramienta.

- Vida útil del filo (T)

Para la cuchilla de plaquita soldada se establece según recomendaciones y a partir de aquí se calcula el valor de velocidad de corte (V) que corresponda al resto de los parámetros de corte seleccionados (t y s). Después, con el mismo valor de V ya calculado, se determina para la cuchilla de plaquita de cambio rápido cuál sería el tiempo de vida útil que le correspondería, según las recomendaciones del fabricante.

- Tiempo de sustitución del filo (t_{ft})

Se determina experimentalmente mediante medición cronométrica del tiempo empleado en cada caso, tomando en consideración el correspondiente procesamiento estadístico de los datos que se obtengan.

- Costo por filo de la herramienta (C_{ft})

Es el aspecto más complejo para determinar, sobre todo para el caso de la cuchilla con plaquita soldada. A continuación se dan las expresiones para su determinación:

Para la cuchilla de plaquita de cambio rápido:

$$C_{ft_{rap}} = \frac{C_{pl}}{n_f} + \frac{1}{n_1} C_{sop} + \frac{1}{n_2} C_{REP} \quad (2.4)$$

Donde:

C_{pl} - costo de una plaquita; \$

n_f - número de filos de la plaquita

C_{sop} - costo del mango o soporte portaplaquita; \$

C_{REP} - costo de los elementos del mango que se consideran repuestos gastables; \$

n_1 y n_2 vida útil (expresada en cantidad de filos) del mango o soporte y de las piezas de repuesto respectivamente.

Los valores de n_1 y n_2 son muy difíciles de establecer. De hecho, el soporte en sí mismo no se deteriora (si no se consideran golpes o daños por mal uso o manipulación) y sólo están sujetas a desgaste fundamentalmente las piezas consideradas como repuestos. Se asume en primera aproximación, para períodos largos de trabajo ($\frac{1}{Z} \rightarrow 0$ en expresión (2.2)), que n_1 es un valor suficientemente grande para que el 2do término de la ecuación (2.4) pueda despreciarse y que $n_2 = 100$ (valor pequeño).

Para la cuchilla de plaquita soldada

$$C_{ft_{sold}} = \frac{C_H}{n+1} + nC_{afil} \quad (2.5)$$

El costo de un afilado de la herramienta puede determinarse por la siguiente expresión

$$C_{afil} = T_{af} \frac{S_{af}}{60} \left(1 + \frac{\lambda}{100}\right) \quad (2.6)$$

Donde:

T_{af} - tiempo de duración del afilado; min

S_{af} - salario del afilador; \$/hora

$\lambda = 5 \%$ factor que tiene en cuenta los costos inducidos de la operación del afilado.

Donde:

C_H - costo de la herramienta; \$

C_{afil} - costo del afilado del filo; \$/filo

n - cantidad de afiladas posibles en la herramienta dada.

La cantidad n de afiladas es un valor dependiente del diseño y dimensiones de cada una de las herramientas de plaquita soldada y que en general se determina a partir de consideraciones geométricas de la parte cortante. Para el caso de la herramienta que se analiza, este valor puede calcularse por la expresión (2.7):

$$n = \frac{M \cos(\alpha + \phi)}{h_z \frac{\tan \cos(\alpha + \phi)}{\cos \phi} + \Delta h} \quad (2.7)$$

Donde:

$M = (6,0 \div 7,0)$ b magnitud afilable de la herramienta y b es el ancho de la plaquita; mm.

α - ángulos de incidencia y desprendimiento, respectivamente; ($^{\circ}$).

h_z - desgaste permisible en la superficie de incidencia; mm.

Δh - tolerancia para la magnitud afilada; mm.

En la tabla 2.2 se muestran los valores específicos para la herramienta considerada y para las condiciones de corte seleccionadas.

Tabla 2.2. Parámetros de la herramienta considerada

Parámetros	b[mm]	α [$^{\circ}$]	ϕ [$^{\circ}$]	hz [mm]	Δh [mm]	n
Valor	-	-	-	0,8÷1,0	0,1 ÷0,25	-

El tiempo de duración del afilado puede variar dentro de diferentes intervalos, en función de las condiciones concretas bajo las que ocurre (manual o a máquina, características del abrasivo empleado).

2.7. Cálculo de la velocidad de corte

La velocidad a la cual gira la pieza de trabajo en el torno es un factor importante y puede influir en el volumen de producción y en la duración de la herramienta de corte. Una velocidad muy baja en el torno ocasionará pérdidas de tiempo; una velocidad muy alta hará que la herramienta pierda el filo muy pronto y se perderá tiempo para volver a afilarla.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.8)$$

Donde:

V_c - velocidad de corte; m/min.

D - diámetro de la pieza; mm.

n_r - números de revoluciones; rev/min.

1 000 - factor de conversión de metro a milímetros.

Los números de revoluciones que se emplearán son: 54; 75; 110 y 300 rev/min.

2.8. Vida útil de la herramienta

La herramienta ideal para una aplicación de mecanizado es la que proporciona un rendimiento predecible y los resultados deseados, al mejor costo, reduciendo el número de herramientas para una operación, resistente al desgaste.

La ecuación de Taylor para un rango de velocidad limitada permite predecir la vida útil de las herramientas. La V_c mantiene una relación exponencial con el tiempo de vida útil de la herramienta. Esta relación se puede expresar, para un rango limitado de velocidades, en forma de ecuación de Taylor para la vida de una herramienta se determina como:

$$V_c T^{n_c} = C \quad (2.9)$$

Donde:

V - es la velocidad de corte; m/min,

T - es el tiempo de vida que tarda en cumplirse la vida útil de la herramienta, min

n_c - es un exponente que depende de las condiciones de corte, así como de las propiedades de los materiales, para carburos, como es nuestro caso está entre 0,2 y 0,5.

C - es la velocidad de corte que corresponde a un tiempo de vida de 1 minuto.

La influencia que ejercen las variables seleccionadas en la herramienta de corte y las diferentes condiciones de mecanizado en la vida útil de las mismas se determina a partir de los regímenes de corte. En la tabla 2.3 se establecen los parámetros para determinar la vida útil de la herramienta.

Tabla 2.3. Parámetros para determinar la vida útil de la herramienta.

No	n_r (rev/min)	t (mm)	s (mm/rev)	T (min)	n_c	V_c m/min	C
1	54	7	0,25	14	0,35	V_{c1}	$C1$
2	75	7	0,43	9	0,35	V_{c2}	$C2$
3	110	5	0,25	7	0,35	V_{c3}	$C3$
4	300	3	0,35	6	0,35	V_{c4}	$C4$

De la tabla 2.3 se puede observar que el avance es el parámetro que tiene mayor influencia en el tiempo de vida útil de la herramienta sobre la pieza mecanizada. Un aumento de n_c representa que la herramienta posee mejores características sobre la resistencia al desgaste.

La combinación de las condiciones de corte, el material de la herramienta y material de la pieza de trabajo, influyen de manera cuantificable en las constantes de la ecuación de Taylor. Se debe de tomar en cuenta los diversos tipos de virutas obtenidas durante el proceso de maquinado.

2.9. Conclusiones del capítulo 2

- Los procedimientos descritos permiten establecer el comportamiento microestructural de la soldadura de las plaquitas en las cuchillas para torno a partir del tipo de material de aporte y el proceso que se emplea para lograr la capilaridad entre el mango y la plaquita.
- La selección de las áreas para analizar el comportamiento microestructural luego del proceso de soldadura oxiacetilénica y en atmósfera controlada, se fundamenta en las variaciones metalúrgicas que se presentan en las mismas, así como las que se presentan en el mango de la herramienta de la cuchilla soldada por oxiacetileno.
- Las ecuaciones desarrolladas permiten establecer el procedimiento metodológico basado en los cálculos de factibilidad entre los procesos de soldadura empleados para la unión de las plaquitas en ambos porta herramientas.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

Para responder a los requerimientos que comporta su utilización, las herramientas deben poseer un conjunto de propiedades intrínsecas tales como: dureza, resistencia al desgaste, tenacidad en el núcleo, templabilidad e indeformabilidad en el temple, resistencia al choque térmico, maquinabilidad para piezas de construcción mecánicas las propiedades más importantes son la resistencia a la tracción, templabilidad y la resistencia a la fatiga, mientras que cuando se usa en la fabricación de herramientas las propiedades exigibles son fundamentalmente la resistencia al desgaste y la tenacidad.

El objetivo del capítulo es establecer la factibilidad de la soldadura de plaquitas de carburo metálico soldada por método convencional y por soldadura oxiacetilénica en base a su comportamiento microestructural.

3.2. Determinación de la factibilidad en las cuchillas

Las propiedades mecánicas de los metales duros están directamente relacionadas con el tamaño de grano y la proporción de fase metálica utilizada en su procesado. Un aumento de fase metálica mejora las propiedades de tenacidad y resistencia al impacto pero disminuye la dureza y la resistencia a desgaste y a compresión. Del mismo modo, cuanto menor sea el tamaño de grano, mayor dureza, resistencia al impacto y a la abrasión. Para determinar la condición de factibilidad, se parte de la comparación entre una cuchilla con inserto metálico y otra soldada. En la tabla 3.1 se muestran las condiciones de comparación.

Tabla: 3.1. Condiciones de la comparación

Herramientas	Material a elaborar	Elaboración
SANDVIK PSSNR/L 2525M09 Plaquita SNMMG 120412 – PF	Acero de construcción	Cilindrado ligero – medio de superficies exteriores
HERRAMI X ISO 2 25X25 $\varphi = 45^\circ$	medio de carbono	

Como se muestra en la tabla para la comparación se seleccionó un acero de medio contenido de carbono por ser este tipo de acero uno de los más versátiles empleados en la construcción de partes y piezas de máquina, además por presentar buena maquinabilidad. El tipo de elaboración que se seleccionó está referida a un tipo de operación que se realiza dentro de los procesos de torneado.

3.3. Análisis de los cálculos de factibilidad para las cuchillas

El proceso de unión de insertos de carburo de tungsteno al cuerpo de la herramienta de corte se realiza, entre otros, mediante el proceso de soldadura fuerte usando la técnica de gases combustibles (oxígeno + propano, oxígeno + acetileno u otros gases combustibles) utilizando un equipo de soldadura autógena; por costos resulta ser uno de los procesos más ventajosos, ya que es el que menor inversión económica requiere, es una técnica versátil y de fácil mantenimiento; pero se presentan problemas de calidad en la unión y que en la mayoría de los casos reduce la expectativa de vida de la herramienta de corte o se pierde esta por completo, sin contar si es requerido un reproceso posterior por la interrupción del corte de material o se rechaza la pieza parcialmente mecanizada.

En adecuación a la ecuación 2.1 se determina el costo del maquinado por pieza y por herramienta, para ello se consideró un salario del operario de 2,70 \$/h; un costo del tiempo - máquina de 2,70 \$/h; un tiempo de maquinado de 60 min con un tiempo auxiliar de 3 min, el tiempo unitario (t_i) se determinó por la ecuación 2.2, para cuchilla soldada por difusión es de 63 min, por lo que el costo de maquinado por piezas (C_p) será de 1,47 CUP/pieza - herramienta.

En condiciones de corte normales (35 - 40 m/min), pueden trabajar durante unas 3 - 4 horas, y en condiciones de corte de máxima producción, pueden trabajar durante 1 - 2 horas. A medida que se van mecanizando piezas, se va desgastando la herramienta. Cuando este valor se aproxima a los 0,3 - 0,6 mm (en función del ángulo de corte de la cuchilla), se considera que la herramienta está suficientemente gastada y tiene que afilarse si se desea continuar mecanizando la pieza con ella. La calidad de la pieza está muy relacionada con este parámetro.

3.3.1. Análisis de los parámetros para la cuchilla soldada

El concepto que se tiene actualmente sobre los procesos de adición de material y unión de superficies entre materiales es tan amplio como las fuentes de energía utilizadas en generar y transferir flujo de calor; para que los materiales de aporte se puedan alcanzar la temperatura de fusión y se logre el mecanismo o fenómeno físico-químico de unión o coalescencia. El proceso de unión por medio de soldadura fuerte (*brazing*) para la fijación de insertos de carburo de tungsteno (tungsteno) al cuerpo de la herramienta de corte, tal

caracterización implica la determinación de las relaciones causa - efecto entre los parámetros de proceso y las características de calidad que se pretenden para la unión. En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros a considerar para la cuchilla soldada.

Tabla: 3.2. Parámetros a tener en cuenta en la cuchilla soldada

Parámetros	b [mm]	α [°]	φ [°]	h_z [mm]	Δh [mm]	n
valor	12	6	10	0,8 – 1,0	0,1 – 0,25	32

En la tabla 3.2 se muestran los parámetros para la cuchilla soldada, se seleccionó una placa con un espesor de 12 milímetros la cual puede ser empleada, tanto en mangos cuadrados, como en rectangulares y en dependencia del material que se mecanice (medio carbono) y de los ángulos de incidencia y desprendimiento seleccionados según la tabla, permite diferentes posibilidades de afilados (n), en nuestro caso y por la operación seleccionada, admite 32 veces.

En el proceso de elaboración de los ángulos de la cuchilla, el de incidencia está entre 5 y 10°, para evitar el rozamiento entre el talón de la herramienta y la parte mecanizada; su origen se hace coincidir con la superficie mecanizada de la pieza y el sentido positivo es el antihorario. Se seleccionó 6° ya que se hace necesario que sea lo menor posible a fin de no debilitar la punta de la herramienta, no fue más pequeño ya que se produce un excesivo rozamiento entre la herramienta y la pieza y genera incrementos de temperatura que pueden afectar a las propiedades mecánicas y geométricas de ambas.

Un ángulo excesivo para el maquinado del acero AISI 1045, entonces trae como consecuencia la rotura de la punta de la cuchilla y un excesivo tiempo en el reafilado de la herramienta.

La selección de un ángulo de desprendimiento de 10° está relacionada con el ángulo de incidencia, este ángulo de desprendimiento tiene mucha influencia en la formación de la viruta, ya que está provocada por una combinación del filo cortante y la cara de desprendimiento. Toma valores entre - 5 y 30° y tiene su influencia sobre las fuerzas de corte, temperatura y morfología de la viruta.

Como la cuchilla soldada va estar sometida a grandes esfuerzos localizados, altas temperaturas, deslizamiento de la viruta por la cara de ataque y deslizamiento de la

herramienta por la superficie recién cortada. Estas condiciones inducen el desgaste de la herramienta que, a su vez, afecta de forma negativa la vida de la misma, la calidad de la superficie mecanizada y su exactitud dimensional y en consecuencia, a la economía de las operaciones de corte.

La rapidez del desgaste depende de los materiales de la herramienta y de la pieza, la forma de la herramienta, los fluidos de corte, los parámetros del proceso (como la velocidad de corte, avance y profundidad de corte) y de las características de la máquina herramienta. Además es un factor clave dentro del mecanizado, ya que afecta la calidad superficial y dimensional de las piezas elaboradas, según criterio de Liew *et al.* (2003), así como también aumenta la fuerza de corte expuesto por Poulachon *et al.* (2001).

3.3.2. Análisis de los parámetros para el costo del afilado

La implementación del afilado se tiene en cuenta cuando se trata de herramientas cuyo afilado y reafilado lo realiza el usuario en máquinas afiladoras, la herramienta se coloca en un soporte que debe orientarse en el espacio frente a la muela abrasiva para lograr los ángulos requeridos, de un modo cuya simpleza y practicidad está íntimamente relacionado con los ángulos que contempla la norma. En la tabla 3.3 se muestran los parámetros para la determinación del costo del afilado del filo.

Tabla: 3.3. Parámetros para la determinación del costo del afilado del filo (C_{af})

Parámetro	T_{af} [mm]	S_{af} [\$/hora]	λ [%]	C_{af} [\$/filo]
Valor	1,28	1,05	5	0,023

Para el cálculo de costos, correspondientes a los términos de la ecuación (2.5) relacionada con el costo por filo de la cuchilla de plaquita soldada, estos resultados se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de los costos por filo de la placa soldada

Parámetro	C_H [\$]	n (u)	C_{ftsold} [\$/filo]
Valor	6,91	19	0,9

De modo análogo puede calcularse el costo por filo de la herramienta de plaquita de cambio rápido empleando la ecuación (2.4) y los valores de los parámetros que en ella aparecen y que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados de los costos por filos para plaquita de cambio rápido

Parámetros	$C_{pl}[\$]$	$n_f[u]$	n_1	$n_2 [u]$	$C_{rep}[\$]$	$C_{ftrap}[\$/filo]$
Valor	6,73	8	10 000	100	24,03	1,09

Los resultados que se muestran en las tablas 3.3, 3.4 y 3.5 están relacionados con la selección de la placa y de los ángulos, ambos parámetros permiten definir el costo de afilado del filo de la herramienta, sin embargo, estos parámetros tienen mucha relación con la experiencia del operario ya que el tiempo de duración del afilado puede variar dentro de límites bastante amplios, en función de las condiciones concretas bajo las que ocurre (manual o a máquina, calificación y experiencia de los afiladores, calidad y características del abrasivo empleado).

Las normas establecidas por los diferentes países (ASA, BS, DIN, AFNOR) como la internacional ISO no resuelve a total satisfacción ambos aspectos y en lugar de clarificar el tema han creado confusión, dando lugar a que los fabricantes de herramientas no hayan podido unificar la nomenclatura ni el vocabulario que defina en forma universal la geometría de las herramientas.

Si bien la geometría de algunas herramientas y algunas operaciones de arranque de viruta requieren de muchos ángulos para su completa caracterización, en la mayoría de los casos alcanza con unos pocos. El aspecto del afilado solo es tenido en cuenta para herramientas reafilables pero carece de interés para herramientas de plaquitas descartables, puesto que sus ángulos están definidos por las geometrías del portaherramienta y de la propia plaquita y el usuario utiliza su criterio y las recomendaciones del fabricante para seleccionarlas en base al trabajo que debe realizar. Los fabricantes de herramientas, especifican la geometría a través de los ángulos mínimos necesarios sin hacer referencia a las normas vigentes, según lo considerado por Iqbal *et al.* (2007).

Para las condiciones de afilados de la plaquita de cambio rápido (tabla 3.5) los valores de n_1 y n_2 que son la vida útil de la herramienta (expresada en cantidad de filos) del mango o soporte y de las piezas de repuesto respectivamente, se observa que prácticamente la herramienta llega a su vida útil sin ser expuesta a proceso de afilado.

Esta característica se debe a que las cuchillas con plaquitas de cambio rápido son denominados acero de alta velocidad y poseen la adición de grandes cantidades de

tungsteno hasta del 18 % a los aceros al carbono les permite conservar su dureza a mayores temperaturas que los aceros simples al carbono. La aleación de aceros de alta velocidad conocida como 14 - 4 - 1, que mantienen su filo a temperaturas desde 540 hasta 590 °C permite duplicar, en algunos casos, la velocidad de corte con herramientas de estos aceros.

También se aumenta la duración y los tiempos de afilado, con ello también se desarrollan máquinas herramienta más poderosas y rápidas, ya que estos aceros de alta velocidad se usan para herramientas de corte de aplicación a materiales tanto metálicos como no metálicos, coincidente con Asad *et al.* (2008).

3.3.3. Resultados del afilado para las cuchillas

Para conocer las aleaciones de aceros para herramientas hay que saber las funciones que cumplen cada uno de los elementos que forman la aleación. De acuerdo a los elementos que componen la plaquita la misma presentará diferentes propiedades. Los elementos se agregan para obtener una mayor dureza y resistencia al desgaste, mayor resistencia al impacto, mayor dureza en caliente en el acero y una reducción en la distorsión y pandeo durante el templeado. A partir de la ecuación (2.3) y sustituyendo en ella los valores, en la tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos de los costos por filos del maquinado con cada una de las cuchillas analizadas.

Tabla 3.6. Costos por filo del maquinado con cada una de las cuchillas analizadas.

	Plaquetas de cambio rápido				Plaquetas soldadas			
Parámetros	T[min]	t_{fe} [min]	C_{fe} [\$/filo]	C'_p [\$]	T[min]	t_{fe} [min]	C_{fe}	C'_p [\$]
Valores	84,6	0,5	1,09	1,48	60	1,0	0,79	1,47

Para evaluar estos costos se ha considerado que el costo se refiere al maquinado de una pieza que demora $t_z = 60$ min y que el tiempo de sustitución del filo es en la cuchilla de plaquita soldada el doble que en la cuchilla de plaquita de cambio rápido, lo que evidentemente beneficia a la de plaquita soldada. El análisis de los resultados aunque se refieren a la comparación entre dos tipos particulares de cuchillas en cuanto a sus especificaciones, es posible determinar las condiciones en cuanto a sus costos.

El empleo de cuchillas de cambio rápido en las máquinas universales convencionales no sólo es técnicamente posible sino incluso recomendable y económicamente ventajoso. Como se observa en la tabla 3.6, el tiempo de amortización de las cuchillas de cambio

rápido es mayor que el de las soldadas, debido a los altos precios relativos de algunos de sus componentes sobre todo el mango soporte y las propias plaquitas. En este sentido la existencia de mangos soportes más baratos podría contribuir a que aún los talleres más pequeños pudieran tener acceso a la adquisición de estos tipos de herramientas.

Aunque no se dispone de datos numéricos concretos que lo corroboren, en algunos trabajos como Pires y Diniz (1997) se pone de manifiesto de que la vida útil de las plaquitas de cambio rápido es a veces considerablemente mayor que la que resulta de los cálculos que ofrecen los propios fabricantes. Esto favorece aun más el empleo de estas herramientas.

Otras de las particularidades de las cuchillas de cambio rápido para corte, están fabricadas con polvo de óxido de aluminio, compactado y sintetizado en formas de insertos triangulares, cuadrados o rectangulares. Son sintetizadas sin aglomerante o con pequeñas cantidades de algún vidrio, son muy duras y son químicamente inertes, pero presentan como desventaja que son más frágiles o quebradizas que los carburos u otros materiales. Son muy resistentes al desgaste y en la máquina adecuada se puede trabajar al doble de la velocidad de corte que en las máquinas con herramientas de carburo. En algunos casos, hasta se puede trabajar a mayores velocidades, según criterio de Tarres *et al.* (2008).

Por otro lado, las herramientas de carburo se dividen en dos categorías principales. Una de ellas se compone de las de carburo de tungsteno simple que son duras y tienen buena resistencia al desgaste, se consideran las más adecuadas para mecanizar hierro colado, metales no ferrosos y algunos materiales no metálicos abrasivos. Los tipos más duros de carburos también se pueden emplear para aplicaciones en las que sea importante la resistencia al desgaste y los choques impuestos sean pequeños. La segunda categoría (clase 5 - 8) comprende las combinaciones de carburo de tungsteno y de titanio y tienen como desventaja, con relación a las plaquitas de cambio rápido, que generalmente se usan para mecanizar acero, de acuerdo con lo expuesto por Caballero (2008).

Todo lo anterior expuesto repercute en la maquinabilidad del acero, ya que para caracterizar el comportamiento de un determinado material suele emplearse este concepto, entendida como la aptitud que presenta este para ser mecanizado. La maquinabilidad de los materiales es una propiedad fundamental en la fabricación de componentes mediante mecanizado

debido a su repercusión directa sobre los costos de fabricación, tanto desde el punto de vista herramental como de tiempos de mecanizado, planteado por Devries (1992).

3.4. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura por difusión

Se realiza el análisis microestructural para determinar la influencia del proceso de soldadura por difusión en las plaquitas y el proceso de soldadura oxiacetilénica realizada en los talleres de las industrias cubanas. Las figuras 3.1 (a) y 3.1 (b) se corresponden con las microestructuras para soldadura por difusión.

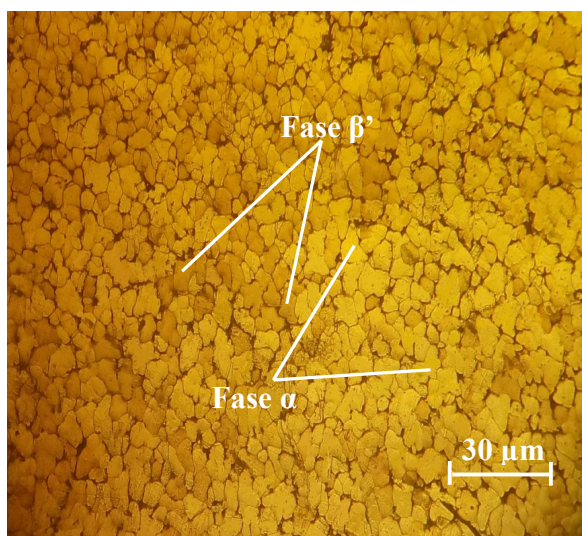


Figura 3.1 (a). Lado de la plaquita.

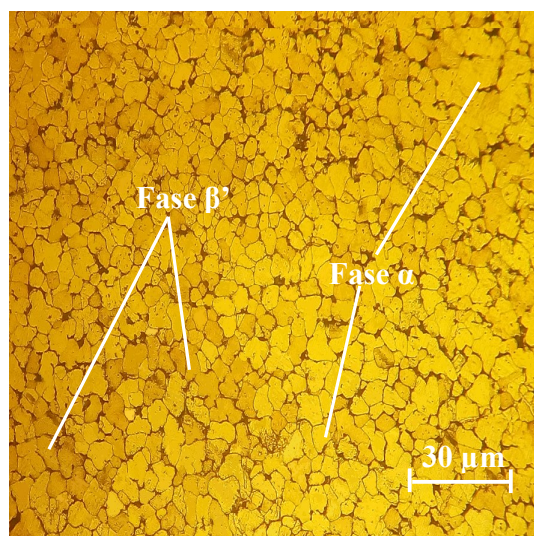


Figura 3.1 (b). Lado del mango.

Tanto en la figura 3.1 (a) que se corresponde con la soldadura del lado de la plaquita, como en la figura 3.1 (b), que se corresponde con la soldadura analizada del lado del mango, se observa una estructura de granos columnares, compuesto por la presencia de fase β' (color más oscuro) y fase α (color claro).

Ambas estructuras se caracterizan por su heterogeneidad microestructural, con granos equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, con algunas partículas pequeñas de segunda fase dispersas dentro de ellos y maclas térmicas. La particularidad de esta microestructura, se observa que el menor tamaño promedio de grano, en apariencia, corresponde al normalizado seguido en orden creciente de magnitud por el estado de entrega y después por todas las condiciones de control, entre los 500 y 800 °C.

Para una condición de soldadura por difusión, durante la aplicación de presión de soldadura, la intercara de contacto experimenta una tensión normal que da lugar, de

acuerdo con la teoría termodinámica de la difusión a una diferencia de potencial químico, en este caso entre la intercara y la superficie de los poros remanentes. El gradiente de potencial químico provoca la difusión entre los átomos hacia la superficie de los poros, disminuyendo el volumen de los mismos. La transferencia de materia puede tener lugar por la propia intercara, a través de la red cristalina (difusión en volumen) o por una superficie, reportado por Kajihara (2006).

Cuando se ponen en contacto las superficies a unir y comienza la aplicación de presión, el área de contacto entre las microrrugosidades, inicialmente pequeña (1% del área total), empieza a aumentar debido a que a la temperatura de trabajo, el límite elástico disminuye. El aumento del área de contacto aumenta aún más cuando se sobrepasa el límite elástico, produciéndose la deformación plástica.

3.4.1. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura oxiacetilénica

Las figuras 3.2 (a) y 3.2 (b) se corresponden con la soldadura realizada con llama oxiacetilénica. Se considera la microestructura de la zona del lado de la plaquita y la soldadura de la zona del lado del mango.

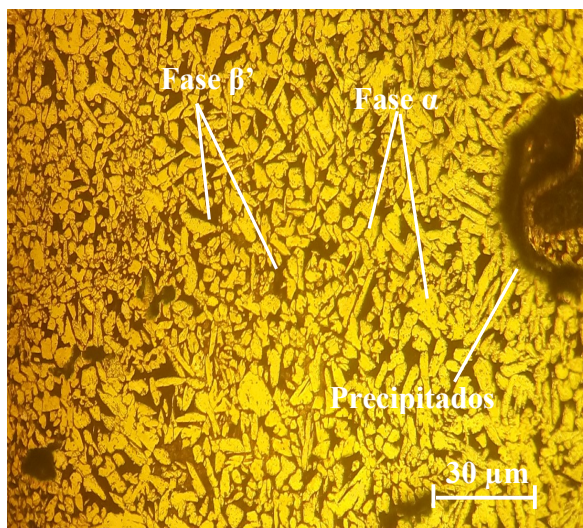


Figura 3.2 (a). Lado de la plaquita.

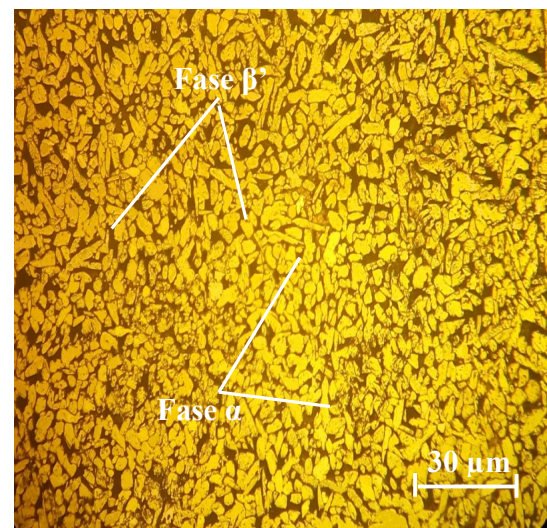


Figura 3.2 (b). Lado del mango.

Las microestructuras obtenidas con este tipo de proceso es consistente con la presencia de fase β' (color más oscuro) y fase α (color claro), pero se observa precipitados. Aunque presenta cierta similitud con la soldadura por difusión, aquí los granos tienen una forma alargada, esto se debe a la acción simultánea de la temperatura de la llama y la presión para lograr la unión con el mango de la cuchilla.

Cuando los granos de un metal de grano fino recrystalizado empiezan a crecer rápidamente, a expensas de otros granos, cuando se calientan a temperatura superior. Este fenómeno se conoce con el nombre de crecimiento anormal de grano. La fuerza impulsora para el crecimiento anormal de grano es la disminución de la energía superficial, pero debido a que el fenómeno muestra una cinética similar a la de recrystalización se le denomina frecuentemente recrystalización secundaria según lo considera Dieter (1986).

En ambos lados, la microestructura sigue conservando en esencia todas las características mencionadas para el estado de entrega. Con el aumento de la temperatura, a partir de esta condición normalizada, los bordes de grano se definen más en aspecto y tamaño, adquiriendo una forma más regular y redondeada a los 800 °C, aunque se mantiene la heterogeneidad microestructural.

La presencia de las maclas persiste para todas las temperaturas y disminuye a los 800°C. Todo ello aunado al comportamiento del esfuerzo de fluencia, concuerda con las características microestructurales que presentan los materiales en presencia de procesos dinámicos de restauración según consideran Shackelford (1998) y Humphreys (2006), que habrían comenzado con una recrystalización parcial en el normalizado a 400 °C. A medida que aumenta la temperatura de soldadura, se espera la presencia de eventos dinámicos que originen cambios microestructurales en el material tendente, por lo general, al aumentar su tamaño de grano, disminuye su esfuerzo de fluencia.

Para ambas condiciones de soldadura se observó que, en el análisis de las zonas oscuras muestra que se tratan de impurezas de óxidos y sulfuros. Los óxidos encontrados son impurezas superficiales que se eliminan fácilmente con un ligero desbaste previo al proceso de soldadura.

3.4.2. Análisis microestructural del mango de las cuchillas

El mango de las cuchillas para tornear, independientemente de las dimensiones del mango (cuadrado o rectángula), del tipo de cuchilla (derecha o izquierda) o del tipo de operación que se realiza (cilindrado exterior e interior o refrentado), se fabrican de acero AISI 1045.

El acero 1045 es un acero hipoeutectoide (0,40 - 0,50 % C). La presencia de elementos aleantes, como pueden ser Mn, Si, S, P y otros elementos minoritarios, modifican levemente las líneas de transformación del diagrama de fases Fe - C debido a sus

comportamientos específicos como elementos alfégenos o gammágenos. La microestructura del acero en estado de recepción viene determinada por el proceso de fabricación (normalmente en estado recocido o laminado en caliente y normalizado).

Se determinó el comportamiento microestructural de los mangos de la cuchilla según el tipo de proceso de soldadura como se describió en la figura 2.2 del epígrafe 2.3.1 del capítulo 2. Las figuras 3.3 se corresponden con el análisis microestructural. La 3.3 (a) es la estructura de la soldadura por difusión y la figura 3.3 (b) se corresponde con la soldadura oxiacetilénica.

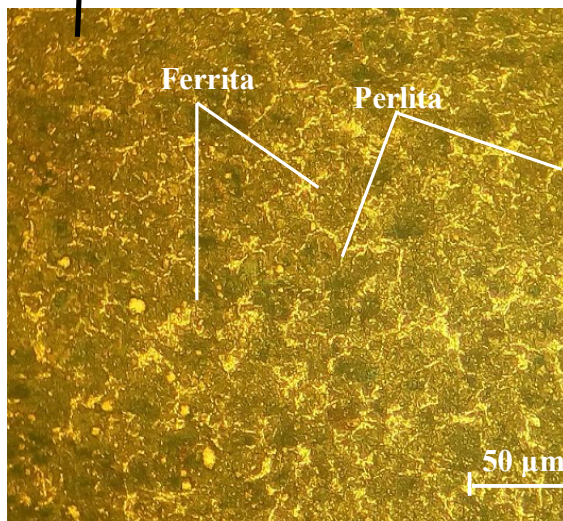
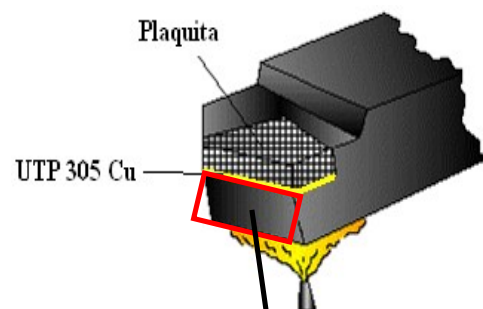
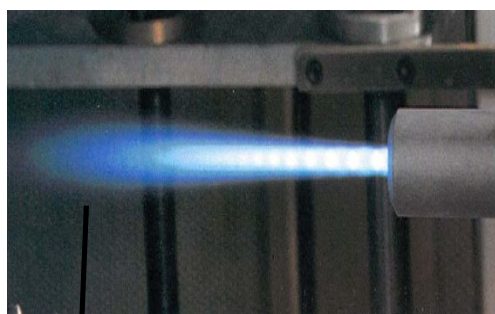


Figura 3.3 (a). Soldadura por difusión.

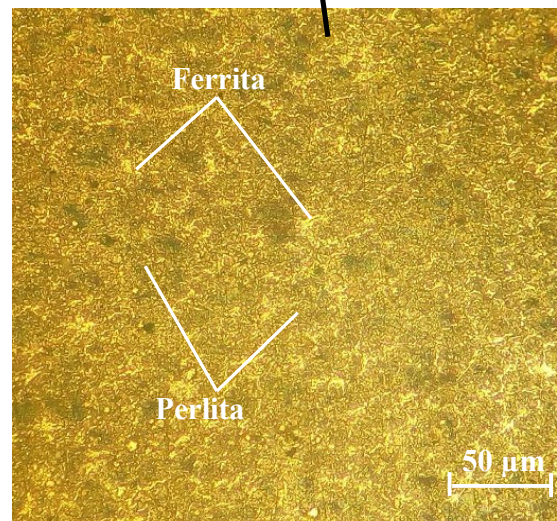


Figura 3.3 (b). Soldadura oxiacetilénica.

El análisis microestructural muestra una microestructura ferrítico - perlítica típica para estos aceros, con relación ferrita: perlita aproximadamente 1:1. Dado el tamaño de grano y a la distancia interlaminar de la perlita se puede suponer que el acero ha sido sometido a un tratamiento térmico durante un largo tiempo.

Dentro de la matriz ferrítica se pueden observar diversos tipos de precipitados distribuidos por toda la muestra. En el análisis se observan inclusiones muestra que se trata de óxidos y sulfuros. La adición de elementos aleantes, tales como el manganeso y el aluminio, tienen por misión desoxidar, y en general, afinar el acero (aluminio) y aumentar la resistencia y desulfurar (manganeso). Si se dan las condiciones adecuadas para la difusión de estos elementos dentro del acero, precipitarán en forma de inclusiones de mayor o menor tamaño. Sin embargo, las inclusiones que generan también poseen un efecto perjudicial, ya que pueden actuar como concentradores de tensiones y ser foco de propagación de grietas.

3.5. Análisis del tiempo de vida útil de la herramienta

Durante los procesos de mecanizado se genera una gran cantidad de calor en la zona de trabajo, por una parte, debido a que la energía requerida para deformar al material se convierte en calor y por otra parte, a que también se disipa el calor producido por la fricción entre la herramienta y el material. En la tabla 3.7 se muestran los resultados obtenidos para la soldadura oxiacetilénica y por difusión respectivamente.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos de la vida útil de la herramienta

No	n_r (rev/min)	t (mm)	s (mm/rev)	T (min)	n_c	Vc (m/min)	C (min)
1	54	7	0,25	14	0,35 / 0,3	8,48	18,71 / 21,3
2	75	7	0,43	9	0,35 / 0,3	11,78	22,76 / 25,4
3	110	5	0,25	7	0,35 / 0,3	17,27	30,96 / 34,1
4	300	3	0,35	6	0,35 / 0,3	47,1	80,62 / 88,2

Como se observa en la tabla 3.7 la vida útil de la herramienta (C) en correspondencia con la tasa de remoción de material, existe menor tiempo de vida útil, que con los incrementos en la velocidad de corte aumenta la vida de la herramienta.

En relación con la vida de la herramienta, la literatura especializada recoge diversa experimentación que desaconseja el mecanizado en seco debido al excesivo desgaste generado en la herramienta en comparación con otros sistemas, como la refrigeración/lubricación convencional y el sistema MQL (Diniz y Micaroni, 2002) (Diniz y Oliveira, 2004).

Ensayos realizados mediante mecanizado en seco, sobre acero, ofrecen tasas de eliminación de viruta inferiores a las obtenidas en ensayos similares realizados empleando aceite sintético con un 6% de concentración de agua, para distintas velocidades de corte y

avances. No obstante, a medida que se incrementa el avance de la herramienta o simplemente avance, se reducen las diferencias entre ambos sistemas. Asimismo, la rugosidad superficial obtenida en el mecanizado en seco mejora la obtenida mediante refrigeración/lubricación convencional (Diniz y Micaroni, 2002).

Las velocidades de corte deben ser escogidas de tal manera que la vida útil de la herramienta a la velocidad más alta no sea menor de 5 min (ANS, 1985) y para el análisis de volumen del material removido, la tasa de remoción de material aumenta con la aplicación de altas velocidades de corte. El desgaste en una herramienta de corte que opera a alta velocidad, se produce con mayor intensidad y hace que el cambio de la herramienta sea frecuente. El tiempo de cambio de herramienta aumenta el tiempo de inactividad de la máquina y reduce la productividad de mecanizado. Por otro lado una baja razón de material removido aumenta el tiempo de operación para una misma cantidad de volumen.

3.6. Análisis de la microdureza

Para determinar la dureza luego de aplicado el ciclo térmico de soldadura, se analizaron las muestras en cada una de las pasadas realizadas. Se realizaron como mínimo tres mediciones en cada zona. En la tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.8. Resultados de la microdureza

Soldadura por difusión				
Medición	HV1	HV2	HV3	HVT
1	100	101	101	101
2	99	99	100	99
3	97	96	95	96
Soldadura oxiacetilénica				
Medición	HV1	HV2	HV3	HVT
1	120	121	119	120
2	105	105	105	105
3	100	101	99	100

En los perfiles de dureza realizados y según los resultados que se muestran en la tabla 3.8, se puede plantear que para un primer proceso de soldadura, hay una dureza de 101 HV, la cual disminuye hasta 96 HV luego de realizada la unión por difusión. En la soldadura oxiacetilénica, la dureza es de 120 HV y disminuye hasta 100 HV. El material se afecta térmicamente debido al calor generado por el proceso, la presión que se ejerce para lograr la unión entre el inserto y el mango, también tiene influencia en la dureza del depósito.

3.7. Valoración económica

Al abordar la valoración técnico económico del proceso de torneado, se parte del hecho que durante la fabricación de muestras intervienen en el mismo proceso de maquinado como: corte, preparación de muestra para análisis químico, análisis metalográfico, mano de obra, técnico de laboratorio. Todo ello sin dudas repercute económicamente en el proceso. Los costos asociados al proceso de corte se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resultados del análisis económico, en CUP

Aspectos	Trimetálicas
Costo de pastilla	2
Costo energético de la operación de soldadura	25
Salario preparación de cuchilla	0,341
Salario en operación de soldadura	0,635
Costo energético en el corte de pastillas	0,041
Salario en corte pastilla	0,344
Total	28,361

Los costos por concepto de obra directa se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Resultados de los costos de la mano de obra, en CUP

Costos de mano de obra				
No	Especialidad	\$/horas	Horas trabaj	Costos total
1	Mecánico taller "A"	12,08	4	48,32
2	Técnico de laboratorio	6,75	10	67,5
Sub total				115.82

Luego de realizado el análisis económico del proceso de soldadura de insertos de plaquitas de tungsteno para determinar los cambios microestructurales que ocurren en la soldadura, donde se incluyen los costos por concepto de gastos de materiales y gastos de mano de obra, se incurre en un costo total de 144,181 CUP.

3.8. Valoración del impacto medio ambiental

El interés por salvaguardar el medio ambiente donde nos movemos, trabajamos, alimentamos y vivimos es cada vez de mayor intensidad, aún más si conocemos que su contaminación podría traer como consecuencia nuestra propia destrucción. El conocimiento de la salud del medio ambiente es un factor esencial para la protección que cada hombre debe establecer sobre su entorno.

El desarrollo impetuoso de las fuerzas productivas ha implicado el incremento de los riesgos de contaminación atmosférica, de la misma manera el desarrollo vertiginoso de la industria ha creado desechos, que durante un tiempo se pensó que se podrían depositar en basureros, bien en tierra o en mar sin causar ningún perjuicio. En la actualidad comprendemos que estas acumulaciones no son más que el legado que preparamos para el futuro, que no tienen culpa alguna de la inmadurez del hombre para prever lo que podría pasar si continuáramos contaminando el entorno.

El término “contaminación atmosférica” hace referencia a fenómenos en la atmósfera que ocasionan daños, directa o indirectamente, a la salud humana, a los animales, a las plantas o a los materiales. Dado que el aire es el recurso natural que necesitamos de una manera más inmediata, los fenómenos de contaminación atmosférica tienen una enorme trascendencia. La peligrosidad de estos fenómenos explica la necesidad de un control estricto de las emisiones de sustancias que puedan ser responsables de los mismos, de sus niveles en el medio ambiente atmosférico, y de la vigilancia de su evolución en el entorno.

Durante la preparación de las muestras, hay que elaborarla por el proceso de maquinado, en el mismo se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, ya que en su composición poseen elementos que pueden ser lixiviables, bajo la acción de las temperaturas altas y las lluvias, pasan a las aguas subterráneas contaminándolas. Además en el taller se consume una gran cantidad de energía eléctrica, la cual se toma de la red nacional convirtiéndose en gasto de combustible y contaminación atmosférica debido al proceso de combustión para generar energía.

Los procesos de fabricación mediante arranque de material requieren elevadas cantidades de energía y consumen una gran cantidad de recursos, fundamentalmente agua y minerales. Adicionalmente, el empleo de fluidos de corte, peligrosos para el medio ambiente, para mejorar los mecanismos de corte por medio de la lubricación y refrigeración del conjunto herramienta-pieza, sitúa a los procesos de mecanizado por arranque de material dentro del grupo de procesos que deben avanzar en el camino de la sostenibilidad.

La creciente complejidad de las piezas a producir, exigen que las herramientas empleadas en los procesos de mecanizado presenten calidad constructiva, herramientas defectuosas,



generan piezas con mal acabado, esto genera desperdicio e incrementa el patio de desechos, acumulaciones de chatarras que afectan el ecosistema. La rotura de herramienta genera además, la posibilidad de ejercer un impacto negativo en el medio ambiente, pudiendo causar daños en el terreno o en los recursos hídricos, debe considerarse la posibilidad de generación de polución debido a los procesos de descomposición/disociación de los materiales por efecto de la corrosión.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

- ❖ Al establecer los cálculos de factibilidad, se determinó en cuanto al tiempo de amortización de las cuchillas de cambio rápido, este es mayor que las soldadas, asociado a los precios de algunos de sus componentes sobre todo el mango soporte y las propias plaquitas.
- ❖ La temperatura del ciclo de soldadura determina en gran medida el mecanismo de unión entre el mango de la cuchilla y la plaquita, donde esta temperatura influye en la calidad y durabilidad del par soldado, para la soldadura por difusión, existe un gradiente de calor de menor intensidad, no siendo así para la plaquita soldada por oxiacetilénica, donde el gradiente se incrementa considerablemente.
- ❖ El aspecto del afilado es un elemento fundamental en las herramientas reafilables, luego de realizar el proceso de soldadura, ya sea por difusión o por soldadura oxiacetilénica, se requiere a través de esta operación, garantizar la geometría de la herramienta de corte.



CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ El análisis microestructural realizado en la unión soldada de insertos metálicos del tipo TK, por soldadura por difusión y soldadura oxiacetilénica, se determinó que durante el primer proceso, se obtiene en el material de aporte, estructuras de granos columnares, compuesto por la presencia de fase β' y fase α y en el segundo las mismas estructuras, con la presencia de precipitados y granos alargados que ofrecen menor resistencia.
- ❖ Se determinó que durante la soldadura oxiacetilénica, en el mango de la cuchilla se genera una reducción del tamaño de grano, impuesto por un ciclo térmico de 3 550 °C, esta temperatura provoca que al existir menor tamaño de grano y alargados, también exista menor resistencia mecánica en la cuchilla.
- ❖ Para evaluar los costos de factibilidad del empleo de insertos de cuchillas soldadas, se consideró que en estas herramientas, el costo se refiere al maquinado de una pieza que demora $t_m = 60$ minutos y este tiempo también está en correspondencia con un ángulo de incidencia de 6° y uno de desprendimiento de 10°.
- ❖ Se realizó el análisis económico de los procesos de soldadura de ambos insertos metálicos por diferentes procesos, se consideró gastos de materiales, gastos de mano de obra y por mantenimiento y se incurre en un costo total de 144,18 CUP.



RECOMENDACIONES

- ❖ Durante el proceso de soldadura oxiacetilénica de insertos metálicos, garantizar la limpieza del mango donde va a ser soldado para eliminar suciedades, la misma genera la presencia de precipitados en la microestructura y trae consigo la disminución en la resistencia mecánica de la herramienta de corte.
- ❖ Realizar estudio relacionado con el control de la llama oxiacetilénica durante la soldadura de insertos metálicos ya que las altas temperaturas afectan tanto el material de aporte, como el mango de la cuchilla y esto afecta la resistencia mecánica del conjunto soldado.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Boothroyd, G. Fundamentos del corte de metales y de las máquinas Herramientas McGrawHill. 2002.
2. Coy, N. Corte Térmico (oxicorte, plasma y láser) y Normas Internacionales para la Calidad de Superficies Cortadas Térmicamente. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. 1992.
3. Childs, T. Friction modelling in metal cutting, Wear 260 (3): 310-318, 2006.
4. Christensen, M.; Wahnström, G. Strength and reinforcement of interfaces in cemented carbides. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 24 (3): 80 - 88, 2006.
5. Dawson T.; Kurfess, T. Machining hardened steel with ceramic-coated and uncoated CBN cutting tools The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia. 2008
6. Darwish, S. Effect of tool bit insert-holder assembly on the quality of machined workpieces. 1998.
7. Eigen, N.; Gärtner, F.; Klassen, T.; Aust, E.; Bormann, R.; Kreye, H. Microstructures and properties of nanostructured thermal sprayed coatings using high-energy milled cermet powders. Surface and Coatings Technology 195 (2-3): 344 - 357, 2005.
8. Extrand, C. Contact Angles and Hysteresis on surfaces with chemically heterogeneous islands. Langmuir 21 (2003) 11546.
9. Galvery, W.; Marlow, F. Guía de Soldadura para el técnico profesional. Editorial LIMUSA S.A., México D.F., 2009, p. 77-78.
10. Galvery, W.; Marlow, L.; Frank, M. Guía de Soldadura para el técnico profesional. Editorial LIMUSA S.A., México D.F., 2009, p. 77-78.
11. Ginjaume, A.; Torre, F. Ejecución de procesos de mecanizado, conformado y montaje Cengage Learning Editores. 2005.
12. Godoy, V.; Diniz, A. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. Journal of Materials Processing Technology, 211 (6): 1014 - 1025, 2011.
13. González, M.; Navarro, M. Análisis de la factibilidad económica para la producción de vástagos para cuchillas mediante centros de maquinado. Ponencia III Taller de

- Herramientales tecnológicos y de corte, en Convención Internacional Metanica 98, La Habana, 1998.
14. Gurland, J. Application of Quantitative Microscopy to cemented Carbides, in Practical Applicatios of Quantitative Metallography, STP 839, J.L. McCall and J.H. Steel, Jr., Ed., ASTM, Philadelphia, 1984, pp. 65-84.
 15. Gurdial, B.; Kuebler, J.; Bissig, V.; Janczak-Rusch, J. Brazing of silicon nitride ceramic composite to steel using SiC-particle-reinforced active brazing alloy. 2006.
 16. Groover, M. Fundamentals of Modern Manufacturing, Tercera Edición, Editorial John Wiley & Sons, 2007.
 17. He, J.; Schoenung, J. A Review on Nanostructured WC-Co Coatings” Surface and Coatings Technology 157 (12): 72 - 79, 2002.
 18. Hernández-González, L.; Pérez-Rodríguez, R.; Zambrano-Robled, P. Estudio del Desgaste del Flanco de Carburos Recubiertos y Cermet Durante el Torneado de Alta Velocidad en Seco del Acero AISI 1045, Revista de Metalurgia, Julio 2010.
 19. Hussainova, I. Microstructure and erosive wear in ceramic-based composites. Wear. 258 (112): 357 – 365, 2005.
 20. Karpat, Y.; Özel, T. Mechanics of high speed cutting with curvilinear edge tools, Inter. J. of Mach. Tools and Manufacture 48 (2): 195 - 208, 2008.
 21. Kalpakjian, S.; Schmid, S. Manufacturing Processes for Engineering Materials (5 ed). Pearson Education. 2008.
 22. Kear, B.; Skandan, G.; Sadangi, R. Factors controlling decarburization in HOVF sprayed nano-WC/Co hardcoatings. Scripta Materiala 44 (5): 1703 - 1707, 2001.
 23. Kim, C.; Massa, T.; Rohrer, G. Modeling the relationship between microstructural features and the strength of WC - Co composites. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 24 (2): 89 - 100, 2006.
 24. Kumar, K. Analytical modeling of temperature distribution, peak temperature, cooling rate and thermal cycles in a solid work piece welded by laser welding process, Procedia Materials Science, 2014.
 25. Kuk, J.; Jang, K.; Lee, D.; Kim, I. Effects of temperature and shielding gas mixture on fatigue life of 5083 aluminum alloy. Journal of Materials Processing Technology, 155 - 156, 1408 - 1414, 2004.

26. Luyckx, S.; Love, A. The dependence of the contiguity of WC on Co content and its dependence from WC grain size in WC-Co alloys. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 24 (6): 75 - 79, 2006.
27. Montes, F.; Kususmaatmaja, M.; Rodríguez-Valverde, J.; Cabrerizo-Vilchez, Y. Modeling the Corrugation of the Three Phase Contact Line Perpendicular to a Chemically Striped Substrate, *Langmuir* in Press. 2009.
28. Montes, J. Efecto de la Rugosidad y Heterogeneidad Superficial en Fenómenos de Mojado. Tesis Doctoral., Editorial de la Universidad de Granada. 2009.
29. Rodríguez-Valverde, M.; Tirado-Miranda, M. Doscientos años de meniscos líquidos (1805 – 2005), *Revista Española de Física* 20 (6): 51 - 56, 2006.
30. Maining, R. The importance of Preheat/Postheat in Repair Welding. *Welding Journal*. 62 (5): 27 - 34, 1983.
31. Olson, D.; A. Siewert, T.; Liu, S. *American Society of Materials Handbook*. Fifth printing (1992). ISBN 0-87170-007-7. SAN 204-7586, Printed in the United States of America.
32. Pakandam, F.; Varvani, A. Fatigue damage assessment of various welded joints under uniaxial loading based on energy methods. *International Journal of Fatigue*. 33 (11): 519 - 528, 2011.
33. Pástor, M. Introducción a la metalurgia de la soldadura. Ecuador: Editorial ESPOCH, 2002. p.56.
34. Pyttel, B.; Grawenhof, P.; Berger, C. Application of different concepts for fatigue design of welded joints in rotating components in mechanical engineering. *International Journal of Fatigue*. 34 (4): 35 - 46, 2012.
35. Rivas, M. Introducción de las herramientas de cambio rápido SANDVIK en el mecanizado de ejes de centrífugas en los talleres TANACEN del MINAZ. Ponencia III Taller de Herramientales tecnológicos y de corte, en Convención Internacional METANICA 98, La Habana, 1998.
36. Rodríguez, M.; Gil, L.; Pérez, R.; Ferrara, S. Desgaste de recubrimientos WC - Co - Ni - CrBSi tratados térmicamente. *Revista Latinoamericana De Metalurgia y Materiales*, 29 (2): 135 - 150, 2009.



37. Ramírez, G., Tarrés, E., Casas, B., Valls, I., Martínez, R. Y LLanes, L. Respuesta mecánica bajo solicitaciones de contacto en aceros recubiertos. Proceedings, Anales de la Mecanica de Fractura (2008).
38. Stroppa, D.; Hermenegildo, T. Unfried J.; Oliveira, N.; Ramírez, A. AWS Welding Journal, Brazing and Soldering, Calculating Joint Clearance at Brazing Temperature, American Welding Society, September 2010.
39. Soldexa. Manual de soldadura y catálogo de productos. 2011,
40. Santhanam, A.; Tierney, P.; Hunt, J. Cemented Carbide, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Metal Handbook. 2 (1): 951 - 977, 1990.
41. Shatov, A.; Ponomarev, S.; Firstov, S.; Warren, R. The contiguity of carbide crystals of different shapes in cemented carbides. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 24 (3): 61 - 74, 2006.
42. Sindo, K. Welding of Metallurgy of Welding, Winconsin. 2002.
43. Tong-Yul, C.; Jae-Hong, Y.; Jae-Young, C. Surface properties and tensile bond strength of HVOF thermal spray coatings of WC-Co powder onto the surface of 420J2 steel and the bond coats of Ni, NiCr, and Ni/NiCr, Surface & Coatings Technology, 203, 3250 - 3253, 2009.
44. Upadhyaya, G. Materials science of cemented carbide an Overview. Materials and Design. 22 (4): 483 - 489, 2001.
45. Underwood, E. Quantitative Metallographic, Metallographic and Microstructures, Vol. 9, Edición 9na, ASM Handbook, 1992.
46. Sobolev, V.; Guilemany, J.; Nutting, J. High Velocity Oxi-Fuel Spraying: Theory, Structure-Property, Relationships and Applications, Maney Publishing, UK, (2004).
47. Vidal, M. Cuchilla con plaquita soldada vs cuchilla con plaquita de cambio rápido. Ingeniería Mecánica 2 (1): 37 - 41, 1999.
48. Walker, C.; Hodges, V. AWS Welding Journal, Brazing and Soldering, Comparing Metal-Ceramic Brazing Methods, American Welding Society, October 2008.
49. Zhong, Y. A study on the synthesis of nanostructured WC-10 wt% Co particles from WO_3 , Co_3O_4 , and graphite. Journal of Materials Science 46 (19): 6323, 2011.