

308917



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO

ANALISIS DE PERFILES EXTRUIDOS
DE ZINALCO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA: INGENIERIA MECANICA
PRESENTA: BERNARDO ALEMAN PINEDA

REVISOR DE TESIS:
ING. ALFREDO GONZALEZ RUIZ.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

A mis padres:

**Ramón Alemán Salgado,
Irma Laura Pineda de Alemán.**

**Con el máximo agradecimiento, respeto y
cariño, símbolos de constancia y comprensión.**

A mis hermanos:

Ramón, Víctor Hugo, Ana Laura.

**Por su apoyo incondicional, amistad y
compañerismo.**

A mis abuelos:

**Por esos pequeños momentos y
experiencias que compartimos, que
me enriquecieron enormemente.**

A mis amigos y amigas,

**Por brindarme su apoyo,
confianza y cariño, y sobre todo porque
sé que cuento incondicionalmente con
su amistad.**

**A Richy,
por tu amistad.**

A mis maestros,

**en especial al Dr. Gabriel Torres Villaseñor,
por haber sido el director de esta tesis de
licenciatura, pero sobre todo por su ayuda,
enseñanzas, consejos y por la amistad
compartida para conseguir esta meta.**

A la M.en C. Esperanza Elizabeth Martínez Flores,

**por su apoyo, paciencia y enseñanzas
transmitidas para el logro de este trabajo,
pero ante todo, por la amistad brindada.**

Agradecimientos Técnicos:

**I.Q. Leticia Baños.
Sr. Eduardo Caballero R.**

**Por haber colaborado para la realización de este
trabajo.**

**Al Instituto de Investigaciones en
Materiales de la Universidad Nacional
Autónoma de México, por las
facilidades y atenciones recibidas
para la elaboración de este trabajo.**

**Pierdo el tiempo pensando en lo esencial,
que a veces dejo pasar,
cuantos instantes he ignorado ya,
capaces de haberme cambiado.**

II. Del S.

**"Cuando se conoce demasiado
acerca de una persona se
pierde la mística".**

Gene Simmons.

La misión de la ciencia
consiste en sustituir las
apariencias con los
hechos y las impresiones
con demostraciones.

John Ruskin.

INDICE

Pág

INTRODUCCION	1
Capitulo I. GENERALIDADES DE LA EXTRUSION DE METALES	3
A.Marco histórico y principio	3
B.Proceso de la extrusión.....	5
1.Flujos de material durante la extrusión	8
2.Patrones de flujo típicos en la extrusión en caliente.....	8
a.Patrón de flujo S	9
b.Patrón de flujo A.....	9
c.Patrón de flujo B	10
d.Patrón de flujo C.....	10
C.Métodos de extrusión.....	11
1.Extrusión en frío	12
a.Extrusión directa o frontal.....	12
b.Extrusión indirecta o inversa	12
c.Extrusión combinada.....	12
2.Extrusión en caliente	17
a.Extrusión sin lubricante	17
1) Extrusión directa o frontal.....	18
2) Extrusión inversa o indirecta	20
b.Extrusión con lubricante.....	22
c.Extrusión hidrostática	23
D.Análisis del proceso de extrusión	27

E. Defectos e irregularidades durante la extrusión	29
1. Defecto de piel de víbora	29
2. Formación de embudo	30
3. Defecto de tubo	31
4. Formación de incrustaciones y burbujas	34
5. Variaciones en la estructura a lo largo de la extrusión y a lo largo de la sección transversal del producto	35
6. Esfuerzo de cohesión a la entrada o salida de la zona del dado	36
7. Defectos en el perill	36
8. Defecto de estallamiento central	37
9. Formación de una zona de metal muerto, abombamiento y contracción en la boca de entrada del dado (extrusión hidrostática)	39
10. Fractura en materiales frágiles	40
11. Distorsión	41
12. Formación de cavidad	41
Capítulo II. METODO EXPERIMENTAL	43
A. Antecedentes del zinc	43
B. Propiedades del zinc	44
C. Proceso de extrusión del zinc	47
D. Descripción del equipo utilizado	51
1. Medidas de la distorsión	51
2. Seccionado de muestras	52
3. Prueba de dureza	52

	Pág.
4.Preparación y pulido de las muestras para análisis metalográfico.....	56
5.Fotografía de microestructuras en microscopio electrónico de barrido (M.E.B.)	58
Capítulo III. RESULTADOS Y DISCUSION.....	64
A.Resultados de medidas de la distorsión	64
B.Resultados de dureza Rockwell B	66
C.Resultados de microdureza Vickers.....	74
D.Resultados de metalografías.....	80
E.Discusión.....	100
CONCLUSIONES.....	116
BIBLIOGRAFIA.....	119

INTRODUCCION.

Continuamente se menciona que México no cuenta con una tecnología propia, debido a que siempre se tiene la necesidad de adaptar la tecnología de punta a nivel mundial a los recursos que tenemos disponibles en el país, sin embargo, esto no se logra en la mayoría de los casos y siempre terminamos en una total dependencia del extranjero.

Por lo anterior, y sabiendo lo importante que es en la actualidad el desarrollar métodos y tecnología propios en México, es que decidimos involucrarnos en el proceso de estudio y caracterización de propiedades a que está siendo sometida la novedosa aleación llamada Zinalco en el Instituto de Investigaciones en Materiales (I.I.M.) de la Universidad Nacional Autónoma de México; aleación compuesta en mayor proporción de zinc, del cual, México es uno de los principales productores a nivel mundial.

En el presente trabajo se realiza un estudio de los defectos que se presentan en los perfiles extruidos de esta aleación eutéctico de zinc y aluminio enriquecida con cobre, por medio de pruebas experimentales como son las medidas de distorsión, de macrodureza, microdureza, así como también observaciones de microestructuras en microscopio electrónico de barrido (M.E.B.).

A continuación presentamos las hipótesis para el desarrollo de este estudio:

-La distorsión que se aprecia a simple vista en los perfiles extruidos de zinc es debida al material, o bien al diseño de los dados, por lo que se requerirán dados especiales, o bien a un defecto que se presenta durante el proceso de la extrusión.

-El zinc es un metal susceptible de ser extruido con éxito, y puede ser utilizado como alternativa del aluminio extruido en base a un rediseño de los perfiles.

-Las microestructuras de los perfiles extruidos de zinc correspondientes a una misma extrusión deben ser similares.

-Las propiedades van a depender de la estructura inicial.

-Las microestructuras de un perfil extruido de zinc dependerá del patrón de flujo que se desarrolle en el proceso y de los diversos defectos que se pudieran presentar.

Estas hipótesis podrán ser confirmadas o rechazadas; después de realizar un estudio de la microestructura, dureza y microdureza de los perfiles extruidos de zinc.

CAPITULO I

GENERALIDADES DE LA EXTRUSION DE METALES

A.Marco histórico y principio.

El proceso de extrusión cuenta con un historial industrial que se remonta a más de 160 años, pero ha sido en los últimos 20 años que su importancia económica ha aumentado, principalmente, como resultado de avances tecnológicos impresionantes que han permitido adquirir una vasta experiencia práctica y realizar numerosas investigaciones acerca del proceso de extrusión y de desarrollo herramental.

El principio es muy simple: un tocho o lingote del material se somete a una gran presión y es forzado a pasar a través del orificio de un dado para lograr una reducción en la sección transversal por medio de deformación plástica. Este proceso puede efectuarse a temperatura ambiente, pero debido a las grandes fuerzas que se requieren en la extrusión, la mayoría de los metales son extruidos en caliente, bajo condiciones en las que la resistencia a la deformación del metal sea baja.

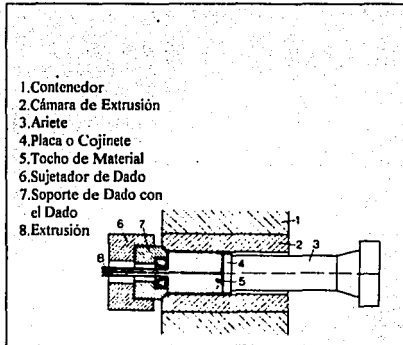


fig.1 Diagrama esquemático de el proceso de extrusión.

La interacción del tocho con el contenedor y con el dado provoca grandes esfuerzos de compresión, los cuales son efectivos para reducir el agrietamiento de los materiales durante la primera etapa de deformación plástica del tocho. Esta es una razón importante por lo que se ha incrementado la utilización de la extrusión para el trabajo de metales difíciles de formar.

La extrusión es un proceso de deformación empleado para fabricar productos alargados, rectos y semiacabados como son barras, perfiles sólidos y huecos, tubos, alambres y cintas; así como también perfiles de sección transversal complicada, dependiendo del material y de los dados utilizados.

La prensa para extrusión hidráulica fue inventada en 1810 por el inglés S. Bramah. Su prensa fue diseñada para extraer plomo, y el principio básico es usado hasta la fecha

para la fabricación de tubos de plomo. El proceso se aplicó con éxito por primera vez para aleaciones con un alto punto de fusión en 1890, por el alemán A. Dick.

B. Proceso de la extrusión.

La mayoría de las extrusiones se hacen con prensas hidráulicas, las cuales están clasificadas en prensas horizontales y prensas verticales, dependiendo de la dirección del eje de presión. Las prensas para extrusión vertical son construidas generalmente con capacidades de 3 a 20 MN. Estas tienen las ventajas de tener un dispositivo de alineamiento más fácil entre el aríete de la prensa y las herramientas, una mayor capacidad de producción, y la necesidad ocupar menor espacio de piso que las prensas horizontales. Sin embargo, necesitan una mayor altura de techo, y para efectuar extrusiones de determinada longitud, forzosamente se requiere de un foso. Las prensas verticales provocan un enfriamiento uniforme en el tocho dentro del contenedor, y por tanto, se obtendrá una deformación uniforme simétrica. En una prensa horizontal para extrusión, la base del tocho permanece en contacto con la superficie del contenedor, por lo que se enfría más rápido que la parte superior, a menos que el contenedor se caliente internamente, y por tanto, se producirán tubos con un espesor de pared disperejo. Comercialmente, el principal uso de las prensas verticales está en la producción de tubos de pared delgada, donde se requieren espesores de pared uniformes y concentricidad. Las prensas horizontales para extrusión son usadas para fabricar la mayoría de las barras y perfiles comerciales. Generalmente se construyen prensas horizontales con una capacidad de 15 a 50 MN, pero también se han construido algunas prensas de 140 MN de capacidad.

La velocidad del aríete de la prensa es de gran importancia, ya que se requieren altas velocidades de aríete para extrusión a elevada temperatura donde existe el

problema de la transferencia de calor del tocho hacia las herramientas. Se usan velocidades de ariete de 0.4 a 0.6 m/s para extruir materiales refractarios. Por otro lado, las aleaciones de aluminio y cobre son propensas a volverse quebradizas en caliente, así que la velocidad del ariete debe restringirse a unos cuantos mm/s. Se ha trabajado en equipo especial para las prensas para lograr un programa de control de la velocidad del ariete para mantener una temperatura uniforme durante todo el ciclo.

Los dados y las herramientas que se usan en la extrusión deben soportar un abuso considerable debido a los grandes esfuerzos a que son sometidos, al choque térmico y a la oxidación.

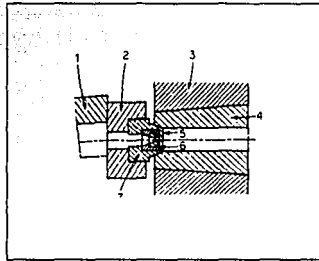


fig.2 Montaje típico de herramientas para extrusión

En la figura se ilustra un montaje típico de herramientas para extrusión. Este montaje está diseñado para facilitar el reemplazo de las partes dañadas y para poder brindar a las herramientas un retabado y un reuso. El grupo correspondiente al dado consiste del dado [#6], hecho de un acero aleado, el cual es sujetado por el soporte del dado [#5] y una solera [#7], todos los cuales están comprendidos en la "cabeza de dado" [#2]. Este ensamble está completamente sellado al contenedor por una superficie cónica de asentamiento por medio de la presión aplicada por una cuña o calce [#1]. Debido a

que el contenedor debe soportar grandes presiones, usualmente está hecho de dos partes. Un revestimiento (#4) es montado dentro del contenedor (#3) en caliente para producir un pre-esfuerzo de compresión sobre la superficie interna del revestimiento. El ariete de extrusión usualmente sufre grandes cargas a compresión. Este está protegido del tocho caliente por una placa o cojinete que va inmediatamente detrás del tocho. Debido a que el revestimiento y la placa o cojinete están sujetos a muchos ciclos de choque térmico, necesitan reemplazarse periódicamente.

En general, existen dos tipos de dados de extrusión. Los dados de cara plana ($\alpha=90^\circ$), que son usados cuando el metal que entra al dado forma una zona de metal muerto e internamente por deslizamiento del material forma su propio ángulo de dado. Del lado de la salida del material, una corta superficie cilíndrica ayuda a fortalecer el dado y permite que cuando se realice retrabajado de la cara plana del lado de la entrada del dado, no se incremente el diámetro de salida. Los dados con entrada de superficie cónica son usados en extrusión con buena lubricación. Disminuyendo el ángulo del dado se incrementa la homogeneidad de la deformación y se disminuye la fuerza de extrusión, pero se llega a un punto en que la fricción se vuelve demasiado grande. Para la mayoría de las operaciones de extrusión un ángulo de dado óptimo se considera que debe estar entre 45° y 60° .

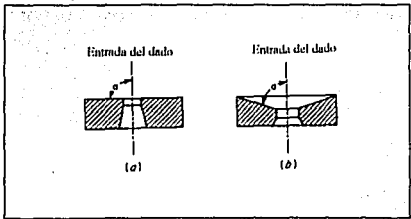


fig.3 Dos tipos de ángulos para los dados de extrusión.

Aparte de la prensa de extrusión, se necesitan dispositivos que permitan un calentamiento fácil del tocho, y para la producción, debe existir equipo automático para depositar el tocho caliente dentro del contenedor. A su vez, se requiere otro dispositivo para calentar el contenedor. Una sierra caliente se necesita para cortar la extrusión, así, el desecho o la cola del tocho puede ser removido del dado. Alternativamente, la extrusión puede hacerse con un bloque de carbón entre el tocho y el cojinete seguidor. Esto permite la completa extrusión del tocho sin cola. Finalmente, debe existir una mesa larga para recibir la extrusión y un enderezador para corregir pandeo en el producto extruido.

1. Flujo de material durante la extrusión

La extrusión generalmente se realiza como proceso discontinuo, es decir, no se carga un segundo tocho sino hasta que el primero ha sido extruido.

En el proceso, se origina un flujo inestable del metal causado por variaciones de temperatura en el tocho y por la limitada longitud del mismo, así como por la fricción generada entre el contenedor y el tocho, y entre el dado y el tocho. Esto provoca que el flujo del metal no sea uniforme a todo lo largo del tocho, esto es, desde el extremo inicial hasta el final del tocho; lo que ocasiona cambios en la fuerza de extrusión durante el ciclo, diferencias de temperatura que provocan variaciones en las propiedades del material a lo largo de la extrusión y en la sección transversal, con la posibilidad de originar defectos.

2. Patrones de flujo típicos en la extrusión en caliente

Sabemos que el flujo del metal varía durante la extrusión dependiendo del material, de la fricción en la interface tocho-herramienta, y del perfil deseado.

Los diferentes patrones de flujo observados han sido clasificados en 4 tipos: S, A, B y C, en orden creciente de irregularidad.

Debemos notar la formación de una zona denominada: zona de metal muerto. Que se origina cuando el metal no puede fluir por la esquina tan cerrada que forman el contenedor y el dado, debido a la aglomeración de material; y sabemos que después de todo, el material busca la trayectoria más corta.

a. Patrón de flujo S.

Representa el flujo más uniforme que puede ser obtenido dentro del contenedor. Este flujo tiene lugar sólo cuando no existe fricción en las interfaces tocho-contenedor, tocho-dado y tocho-soporte de dado; pero en la práctica, esto es imposible.

Este tipo de flujo se presenta cuando existe una buena lubricación, y consiste en que la mayor parte del tocho no extruido es empujado como si fuera completamente un cuerpo rígido, permaneciendo sin deformación, pero la punta del tocho avanza hacia la zona de deformación y pasa a través del dado. Se presenta flujo plástico del metal principalmente en la zona de deformación, que se localiza directamente enfrente del dado.

La zona de metal muerto en este patrón es muy pequeña.

b. Patrón de flujo A

Ocurre cuando prácticamente no existe fricción entre el contenedor y el tocho, pero sí existe en la superficie del dado y su soporte. Esto retarda el flujo radial de las zonas de la periferia e incrementa la cantidad de esfuerzo cortante en esta región, lo que forma una zona de metal muerto con su correspondiente zona de deformación

ligeramente más grandes que las del patrón S. Sin embargo, la deformación en el centro permanece uniforme.

Este patrón es raramente observado en extrusiones sin lubricación, pero ocurre en la extrusión con lubricante de metales y aleaciones suaves.

c. Patrón de flujo B

Se presenta si existe fricción tanto en la pared del contenedor, como en las superficies del dado y su soporte, lo que provoca que el flujo de las zonas de la periferia de la interface tocho-contenedor sea retenido mientras que el material del centro se acelera hacia el dado.

El tamaño de la zona de metal muerto depende de los parámetros de la extrusión y de la aleación, pero de cualquier manera ésta es grande.

Al inicio de la extrusión el esfuerzo cortante se concentra sólo en las zonas cercanas a las interfaces, pero al continuar la deformación, se extiende hasta el centro. Esto incrementa peligrosamente el flujo de material proveniente de la superficie exterior del tocho, que arrastra consigo impurezas o lubricante, que pueden quedar atrapados bajo la superficie de la extrusión.

d. Patrón de flujo C

Este patrón ocurre durante la extrusión en caliente cuando la fricción es elevada como en el tipo B, y cuando la temperatura del tocho no es uniforme, estando más caliente en el centro que en las orillas, incrementando el esfuerzo en las zonas de las interfaces que están más frías; ya que provocan que la superficie exterior del tocho forme una cáscara rígida. Así, la zona de metal muerto tiene forma cónica o de embudo y es, por tanto, mucho más grande y extensa desde la punta del tocho hacia atrás.

Al comienzo de la extrusión, sólo el material del embudo es plástico y es severamente deformado conforme fluye hacia el dado. La cáscara rígida y la zona de metal muerto se encuentran bajo compresión axial mientras la longitud del tocho disminuye.

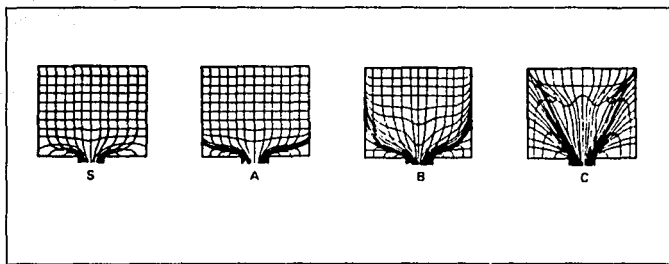


fig.4 Diagramas que esquematizan los cuatro tipos de patrones de flujo en extrusión.

C. Métodos de extrusión

Las diferentes características en el flujo de las diversas aleaciones extruídas así como la complejidad en la relación entre los parámetros de extrusión y el patrón de flujo en el contenedor, hacen imposible el uso de un sólo método para todos los materiales. Generalmente se emplean métodos particulares de acuerdo al comportamiento del flujo típico de la aleación que estemos considerando para obtener una calidad y una productividad óptimas.

Los dos métodos básicos y sus subdivisiones son:

1. Extrusión en frío

- a. Extrusión directa o frontal
- b. Extrusión indirecta o inversa
- c. Extrusión combinada

2.Extrusión en caliente

a.Extrusión sin lubricante

1) Extrusión directa o frontal

2) Extrusión indirecta o inversa

b.Extrusión con lubricante

c.Extrusión hidrostática

1.Extrusión en frío

Se le denomina así debido a que el tocho es hecho pasar por el dado de extrusión a temperatura ambiente. También denominada extrusión por impacto. Cualquier incremento posterior de temperatura, que puede ser de varios cientos de grados, es causado por la conversión del trabajo a calor. Como mencionamos anteriormente, la extrusión en frío comprende la extrusión indirecta, directa y combinada.

a.Extrusión directa o frontal.

En la extrusión directa, el tocho es forzado a deformarse en la misma dirección que sigue el punzón y el arlete.

b.Extrusión indirecta o inversa.

En la extrusión indirecta, el producto sigue un desplazamiento en dirección opuesta al del viaje del punzón.

c.Extrusión combinada.

Los dos métodos básicos anteriores de extrusión algunas veces se combinan para trabajar el tocho con las dos direcciones de flujo.

Estos tres métodos de extrusión en frío se muestran en las siguientes figuras.

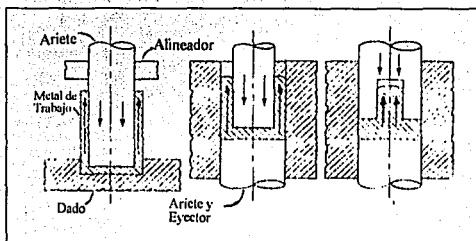


fig. 5 Tres tipos de extrusión indirecta o inversa.
Observar la dirección que lleva el ariete y la dirección del producto.

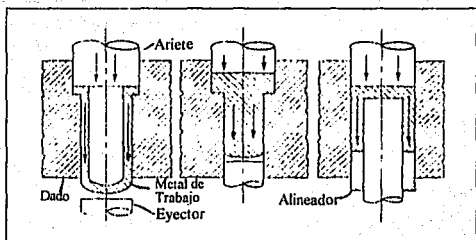


fig. 6 Tres tipos de extrusión directa o frontal.
Observar la dirección del ariete y la dirección del producto.

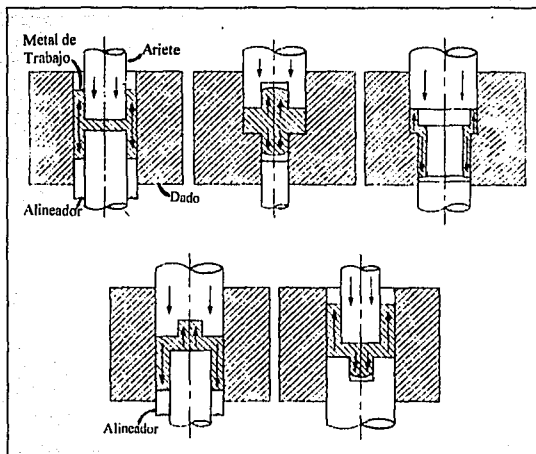


fig. 7 Cinco tipos de extrusión combinada.
Observar la dirección del ariete y la dirección del producto.

El tocho generalmente es un disco circular o una barra, que es colocada en la base del dado que tiene una cavidad del mismo radio pero de profundidad más larga que el espesor del disco. El ariete avanza hacia el metal, provocando que el exceso de material fluya a través del espacio entre el contenedor y el punzón.

El movimiento relativo entre el punzón y el dado se obtiene manteniendo cualquiera de los dos (generalmente el dado) en estado estacionario, y el otro en movimiento.

El eje de la máquina puede ser horizontal o vertical; y la presión puede aplicarse rápidamente de un sólo golpe (extrusión por impacto) como con una prensa de cigüeñal,

o más lentamente con un dispositivo de acción a presión como el de una prensa hidráulica. La presión ejercida por el punzón puede ser tan baja como 34.5 MPa para metales suaves o tan alta como los 3100 MPa que se requieren para la extrusión de aceros.

Cuando los metales son deformados a temperaturas por debajo de su temperatura de recristalización aumenta su dureza, esto puede representar una ventaja si uno de los requisitos del producto es que sea duro, evitando el tener que aplicar algún tratamiento térmico posterior. Por otro lado, el endurecimiento aumenta la resistencia al deslizamiento y disminuye la ductilidad.

Entre las ventajas que presenta la extrusión en frío sobre otros procesos tenemos:

- Ahorros en materia prima.
- Reducción o eliminación de los procesos de maquinado y bruñido debido al buen acabado superficial y a la precisión dimensional de las piezas extruidas en frío.
- Eliminación de tratamientos térmicos, debido al incremento de las propiedades mecánicas de las piezas extruidas en frío.

La extrusión en frío muchas veces no es tomada en cuenta a menos que se vaya a producir una gran cantidad de piezas idénticas, y raramente se emplea para producir menos de 100 piezas.

Prensas utilizadas para extrusión en frío

Se usan principalmente prensas hidráulicas, prensas mecánicas, y prensas especiales con articulación de bisagra para extrusión en frío. La mayoría de las operaciones se realizan en prensas mecánicas debido a su adaptabilidad a otros tipos de operaciones; son más costosas pero proporcionan mayores velocidades que las prensas

hidráulicas de capacidad similar. Una desventaja de la prensa mecánica es su limitada longitud de carrera.

Herramientas utilizadas para extrusión en frío.

El diseño de las herramientas está dictado en mayor parte por las dimensiones de la pieza que se requiere que por aspectos del flujo del metal, de lubricación y otras variables del proceso. Es conveniente distinguir entre los componentes consumibles, como son los punzones, los dados, y el eyector, de los no consumibles, como son los anillos de presión y los cojinetes. Los componentes consumibles son los que tienen contacto directo con el metal a extruir. Estas herramientas están expuestas a una carga específica y a desgaste, por lo que su diseño debe incorporar características que cumplan con los requerimientos de la pieza a la vez que minimicen la carga específica y el desgaste.

Los componentes de un arreglo típico usados para extrusión inversa en frío de piezas de acero se muestran en la siguiente figura.

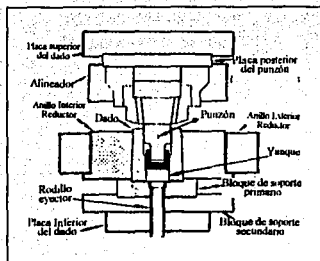


fig. 8 Arreglo típico de extrusión inversa en frío.

En este proceso se pueden emplear lubricantes muy viscosos que disminuyan la fricción como aceite, grasa, cera, sebo y jabón de sodio.

2.Extrusión en caliente

Consiste en forzar al tocho previamente calentado a pasar a través de la abertura del dado. La temperatura a la cual se efectúa la extrusión depende del material a extruir. Se emplea para producir productos largos, rectos y de sección transversal constante, como son barras, secciones sólidas y huecas, tubos, cables y tiras. Como ya mencionamos, existen tres tipos básicos que son la extrusión sin lubricante, con lubricante y la hidrostática.

a.Extrusión sin lubricante

En este caso, el material fluye por deslizamiento cortante interno, y se forma una zona de metal muerto frente del dado.

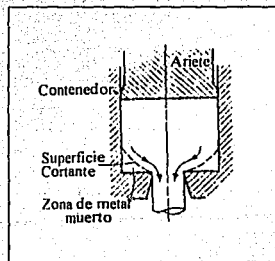


fig. 8. Esquema en el que se muestra la extrusión en caliente sin lubricante, indicando la zona de deslizamiento y la zona de metal muerto.

Este proceso es relativamente sencillo una vez que las condiciones han sido definidas, pero un gran número de factores de metalurgia y del proceso interactúan y afectan las propiedades mecánicas, el acabado superficial y la resistencia a la corrosión del producto final. Como su nombre lo indica, este proceso no utiliza ningún tipo de lubricación en el tocho, en el contenedor ni en el dado, y se pueden producir secciones muy complejas, con acabado superficial casi de espejo y con tolerancias dimensionales exactas. Para este caso generalmente se utilizan dados planos ($\alpha = 90^\circ$).

Como mencionamos anteriormente, existen básicamente dos métodos de extrusión sin lubricante:

1) Extrusión directa o frontal

En la que el arlete viaja en la misma dirección en que lo hace la sección extruída, y se presenta movimiento relativo entre el tocho y el contenedor.

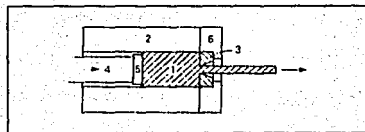


fig. 10 Extrusión directa sin lubricante.

A continuación presentamos una secuencia típica de lo que puede ser el proceso de extrusión directa de un perfil sólido:

- El tocho caliente y el cojinete seguidor se cargan dentro del contenedor.

- * El tocho es extruido por la fuerza aplicada por el arlete, primeramente el tocho es aplastado contra el dado y luego es forzado a pasar a través del dado. Durante la extrusión, una delgada cáscara de material puede permanecer en las paredes del contenedor. La extrusión se suspende con el objeto de dejar a manera de desecho un disco delgado de material (el extremo del tocho) dentro del contenedor sin extruir.
- * Se separa el contenedor del dado, y la sección extruida con el extremo sin extruir del cojinete seguidor.
- * Se corta el desecho.
- * El dado, el contenedor y el arlete regresan a su posición inicial de carga.

En la siguiente figura observamos las curvas típicas de presión contra desplazamiento del arlete para extrusión directa e indirecta, las cuales nos muestran que al inicio, la presión en la extrusión directa crece rápidamente mientras el tocho es aplastado y se acomoda al contenedor. Después de esto, la presión sigue creciendo hasta que comienza la extrusión. Se desarrolla una zona de deformación con forma de cono justo enfrente de la abertura del dado. Después de que se ha alcanzado la máxima presión, ésta disminuye conforme la longitud del tocho disminuye hasta alcanzar un mínimo, entonces, nuevamente se incrementa. Este último incremento en la presión ocurre porque solamente permanece un disco delgado dentro del contenedor, y el metal debe fluir radialmente hacia la abertura del dado, aumentándose considerablemente la resistencia a la deformación con la disminución del espesor del disco.

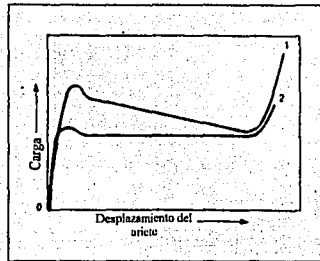


fig. 11 Curvas típicas de presión contra desplazamiento para extrusión directa e indirecta.

2) Extrusión indirecta o inversa

En la que el tocho no tiene movimiento respecto al contenedor, y un dado o un punzón es empujado contra el tocho para producir piezas sólidas.

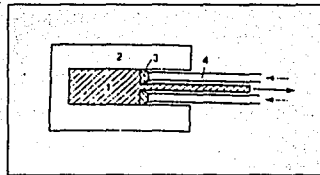


fig. 12 Extrusión indirecta sin lubricante.

De la figura anterior observamos claramente que el dado es el que se empuja con un ariete hueco teniendo movimiento relativo respecto del contenedor, pero no existe desplazamiento entre el tocho y el contenedor. Como resultado de lo anterior, no existe fricción en la interface tocho-contenedor; en consecuencia, la presión de extrusión, la temperatura generada por la deformación y la fricción se reducen.

Una secuencia típica del proceso de extrusión indirecta es como sigue:

- El dado se inserta en la prensa
- El tocho se carga dentro del contenedor
- El tocho es extruido, dejando la cola como desecho
- El dado y el desecho se separan de la sección extruida

Las ventajas que ofrece la extrusión indirecta son:

- Una reducción de 25% a 30% con respecto a la presión máxima requerida en la extrusión directa
- La presión de extrusión no está en función de la longitud del tocho, debido a que no existe desplazamiento relativo entre el tocho y el contenedor. Por tanto, la longitud del tocho no está limitada por la presión requerida para ese desplazamiento, sólo por la longitud y estabilidad que necesita el arrete hueco para un contenedor de una longitud dada.
- No se produce nada de fricción entre el tocho y el contenedor, en consecuencia, no ocurren incrementos de temperatura en la superficie del tocho hacia el final de la extrusión, que son típicos de la extrusión directa. Así como también, la tendencia de que la superficie y las esquinas del tocho se quiebren es menor, lo que permite mayores velocidades de extrusión.
- La vida útil de la herramienta se incrementa, especialmente la del revestimiento del contenedor, por la reducción en la fricción y en temperatura.

La desventaja de la extrusión indirecta radica en que las impurezas o defectos de la superficie del tocho afectan la superficie de la extrusión, ya que no se retienen en una cáscara ó como desecho dentro del contenedor. Para prevenir esto, en la mayoría de los

casos se usan tochos maquinados. Además, el área de la sección transversal de la extrusión queda limitada al tamaño del arlete hueco.

b. Extrusión con lubricante:

En la extrusión con lubricante, como su nombre lo dice, usa un lubricante apropiado (usualmente vidrio o grasa) entre el tocho y el dado.

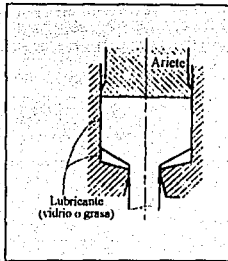


fig. 13 Extrusión directa con lubricante.

Generalmente las aleaciones de aluminio son extruidas sin lubricante, pero las aleaciones de cobre, de titanio, de aceros y aceros inoxidables se extruyen con lubricantes de grafito o lubricantes de base de vidrio. Varios de los lubricantes comerciales que contienen grafito, generalmente no brindan protección térmica al dado, por esa razón, el desgaste del dado es considerable en la extrusión en caliente de aceros y aleaciones de titanio.

c) Extrusión Hidrostática

En este tipo de extrusión, el tocho dentro del contenedor es extruido a través del dado por la acción de un líquido a presión en lugar de la aplicación directa de la presión con un arlete. El proceso de extrusión hidrostática difiere de los métodos convencionales de extrusión en frío y en caliente en que el tocho está completamente rodeado por un fluido, el cual está sellado y lo suficientemente presurizado para extruir el tocho.

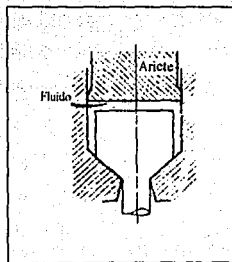


fig. 14 Extrusión Hidrostática.

La extrusión hidrostática puede realizarse en caliente o en frío, y puede usarse para extruir materiales frágiles que no pueden trabajarse con la extrusión convencional. Este método permite mayores reducciones de área que los métodos ya vistos. Se emplea para producir tubos de cobre, cable de aluminio recubierto de cobre, alambres finos de metales preciosos, tubos de aleación de aluminio y cables superconductores de niobio-titanio.

Las principales ventajas del método sobre la extrusión convencional en caliente o en frío son:

- * No existe fricción entre el tocho y el contenedor; en consecuencia, la presión al inicio de la extrusión será mucho menor y teóricamente se pueden extruir tochos de cualquier longitud.
- * La fricción en el dado se puede reducir notablemente con una película de lubricante presurizado entre el metal y la superficie del dado.
- * Las menores presiones de extrusión y la menor fricción del dado permiten el uso de mayores relaciones de reducción o de menores temperaturas de extrusión.
- * La presión hidrostática uniforme en el contenedor implica que el tocho no tiene que ser necesariamente recto, ya que también puede extruirse cable enrollado.

Las limitaciones de este método son:

- * Mantener el fluido bajo altas presiones (hasta 2 G Pa) requiere de sellos confiables entre las paredes del contenedor y el ariete y el dado; y la tecnología para lograr estos sellos para esas partes está lejos de ser accesible. Los sellos entre la punta del tocho y el dado pueden hacerse fácilmente chafaneando o afilando la punta del tocho para que embone con el ángulo del dado.
- * Además de tener que afilar el tocho para que embone con la entrada del dado, el tocho debe ser maquinado totalmente para remover los defectos superficiales, que de otro modo reaparecerán en el producto extruido. Esto se hace patente cuando se usan tochos de fundición.

Prensas utilizadas en extrusión en caliente.

Se usan tanto prensas horizontales como verticales, siendo las más comunes las horizontales. La mayoría de las prensas son hidráulicas, pero las mecánicas son usadas para algunas aplicaciones como la de tubos cortos.

Hay dos tipos básicos de transmisión hidráulica disponible: directa y de acumulador. En el pasado, las prensas de acumulador eran las más usadas, pero ahora son las de transmisión directa, debido al alto costo de las bombas de agua, acumuladores y válvulas, así como por el gran espacio de piso que requerían. La ventaja de las prensas de acumulador de agua son sus elevadas velocidades de ariete (hasta 15 in/s), además de que el agua no es inflamable, una consideración de peso cuando se trabaja con tochos sumamente calientes.

Por otro lado, se incrementó el uso de las prensas de transmisión directa debido al desarrollo de las bombas de aceite; al menor espacio de piso, a su menor costo y a que proporcionan una fuerza constante durante todo el ciclo de extrusión sin caídas de presión; aunque su velocidad es baja (hasta 2 in/s).

Herramientas utilizadas en extrusión en caliente

Consisten de aquellos componentes como contenedores, el revestimiento de conector, vástagos o arietes, cojinetes seguidores, mandriles, dados de puente para producir extrusiones huecas, y dados planos. Los dados más comunes son los de cara plana y los dados de forma.

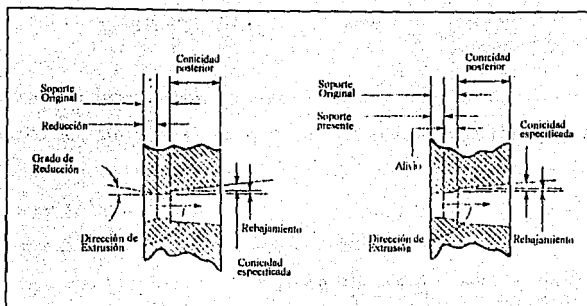


fig. 15 Dos tipos de dados de forma para extrusión con entrada cónica.

Los dados de cara plana, también llamados dados cuadrados, tienen una o más aberturas que son semejantes en sección transversal a la sección transversal deseada para el producto extruido, mientras que los dados para extrusión con lubricante, también llamados dados de forma, generalmente tienen una entrada cónica con una sección transversal circular que cambia progresivamente hasta llegar al perfil extruido requerido.

Para la extrusión hidrostática se requiere equipo de alta presión como el contenedor, el arrete y el dado. Los materiales para las herramientas incluyen aceros y aleaciones níquel-cobalto.

D. Análisis del Proceso de extrusión

Las principales variables que influyen en la carga requerida para la extrusión son: el método de extrusión (directa o inversa), la relación de extrusión, la temperatura de trabajo, la velocidad de deformación y las condiciones de fricción entre el dado y el contenedor. La presión es la fuerza de extrusión dividida por el área de la sección transversal del tocho. El rápido aumento de presión al inicio de la extrusión es debido a la compresión inicial del tocho en la recámara de extrusión. Para la extrusión directa, el metal comienza a fluir en el valor máximo de presión. Mientras el tocho fluye por el dado, la presión requerida para mantener el flujo progresivamente disminuye, junto con la disminución en la longitud del tocho. Al final del proceso, la presión vuelve a incrementarse rápidamente, lo cual es usual, y nos indica que hay que detener el ariete para dejar un pequeño desperdicio en la recámara de extrusión. Este desperdicio normalmente contiene defectos no deseados en el producto.

La relación de extrusión es la relación entre el área de la sección transversal inicial del tocho y el área de la sección transversal del producto después de la extrusión,

$$R = \frac{A_o}{A_f}$$

Debido a que en el proceso es constante el flujo de masa que pasa por el dado, la velocidad del producto extruido es igual a la velocidad del ariete $\times R$, por lo que se explican las altas velocidades de deslizamiento que tienen lugar en la zona del dado. La fuerza de extrusión está directamente relacionada al logaritmo natural de la relación de extrusión, así que la fuerza de extrusión puede expresarse como:

$$P = k * A_o * \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$$

donde k es la constante de extrusión, que considera el esfuerzo de cedencia, la fricción y la deformación.

La mayoría de los metales son extruidos en caliente, así que toman ventaja de la disminución de la resistencia a la deformación con el aumento de la temperatura. Considerando que la extrusión en caliente introduce los problemas de oxidación del tocho y de las herramientas, así como el reblandecimiento del dado y herramientas, en lugar de hacer el proceso más difícil, se logra una mayor ventaja al poder trabajar con el metal con cierto grado de plasticidad.

Al incrementar la velocidad del ariete, se produce un incremento en la presión de extrusión. La selección de una velocidad y temperatura apropiadas, es mejor determinarlas por medio de prueba y error para cada aleación y para cada tamaño de tocho.

Empleando la aproximación para la energía de deformación, el trabajo plástico de deformación por unidad de volumen puede expresarse para extrusión directa como:

$$U_p = \sigma \times \int d\varepsilon = \sigma \times \int_{A_0}^A d \ln A = \sigma \times \ln \left(\frac{A_f}{A_0} \right) = -\sigma \times \ln R$$

donde

ε = esfuerzo a la compresión axial,

R = relación de extrusión,

A_f = área de sección transversal del producto extruido,

A_0 = área de sección transversal del tocho.

Siendo el trabajo:

$$W = U_p \times V = V \times \sigma \times \ln R = p \times A \times L = \text{fuerza} \times \text{dist}$$

donde σ está definida como el esfuerzo de cedencia efectivo en compresión, así:

$$p = \frac{V}{A \times L} \times \sigma \times \ln R = \sigma \times \ln R$$

Esta es la expresión para la presión de extrusión ideal, ya que no involucra la fricción. Si nosotros definiéramos la eficiencia del proceso por η , como la relación de la presión ideal con la real, nosotros podemos expresar la presión de extrusión real p_c como:

$$p_c = \frac{p}{\eta} = \frac{\sigma}{\eta} \times \ln R$$

E. Defectos e Irregularidades producidos durante la extrusión

Los defectos que describimos a continuación son el resultado de un flujo de material irregular en el contenedor. La posibilidad de la presencia de defectos aumenta dependiendo de la naturaleza del patrón de flujo del material, esto es, en el siguiente orden S, A, B, C. Aparte del defecto de embudo, casi ningún otro defecto se encuentra con el flujo tipo S, pero los tipos A y B pueden presentar la formación de una piel, y el tipo C de tubo. Si se usa lubricante, pueden ocurrir inclusiones y burbujas con estos últimos tres tipos de flujo.

1. Defecto de piel de víbora.

También denominado defecto de piel de pescado o defecto de corteza de árbol de abeto. Este defecto ocurre cuando el centro del producto fluye mucho más rápido que su superficie exterior, lo que puede provocar que la "piel" se rompa. Es debido a su apariencia que recibe el nombre de piel de víbora. Este defecto aparece sólo cuando se desarrolla esta combinación única de variables durante el proceso. Los parámetros que gobiernan la formación de este defecto aún no están bien definidos. Cuando se presenta,

se desea tener algún medio de prevención, pero la verdad es que aún no existe; por lo que se debe emplear un costoso procedimiento de prueba y error.

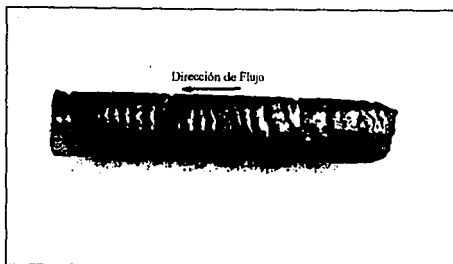


fig.16 Defecto de piel de víbora.

2. Formación de embudo

Causada porque el material del centro fluye más rápido hacia el orificio del dado que el material de la orilla, ocurre generalmente en los patrones de flujo B y C. Así, al aproximarse cada vez más el extremo final del tocho al dado, se forma el defecto de embudo hueco en la parte posterior del tocho; por tanto, el tocho no debe ser extruido completamente, y debe desecharse el extremo final del tocho. La longitud óptima del desecho debe determinarse experimentalmente y debe ser más largo para relaciones de extrusión pequeñas que para relaciones grandes, porque este defecto se desarrolla anticipadamente con relaciones de reducción pequeñas. Este defecto se presenta tanto en extrusión directa como en extrusión inversa.

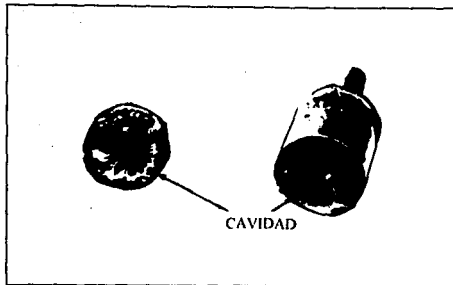


fig.17 Defecto de formación de embudo.

3. Defecto de tubo

Consiste en una separación interna de material, que divide parcial o totalmente la sección transversal de la extrusión en una zona central hueca y en una zona externa a manera de tubo. La cavidad comienza como un pequeño hoyuelo en el tercio último de la extrusión y no debe confundirse con la formación de embudo, que es resultado de un proceso completamente diferente. El defecto ocurre en la periferia del cojinete segulador (dummy block), cuando la capa de óxido en la superficie del tocho pasa a ser el material que fluye más rápidamente en el centro. Las capas del metal entonces fluyen a velocidades desiguales y no pueden mantenerse unidas debido a la capa de óxido. La diferencia en velocidad entre el centro del tocho y la capa exterior es enorme para el patrón de flujo C; como consecuencia, este defecto se encuentra sólo en aleaciones con este patrón de flujo.

Cuando se utilizan dados cuadrados ($\alpha = 90^\circ$), la cavidad se puede iniciar en etapas tempranas de la extrusión, cuando el tocho aún es largo; esta cavidad puede crecer rápidamente y terminar desarrollando el defecto de tubo. Con la disminución del

ángulo del dado, el flujo se vuelve más uniforme y se retarda la formación de la cavidad, y así, el defecto de tubo puede ser prevenido.

Los siguientes métodos pueden emplearse para reducir o eliminar este defecto:

-Para reducirlo: extrusión con cáscara, maquinado del tocho de fundición, extrusión con gran cantidad de desecho; igualar las temperaturas del tocho y del contenedor.

Extrusión con cáscara

En este método el diámetro del cojinete seguidor, es de 3 a 5 mm más pequeño que el del contenedor. La cáscara que es cortada por el cojinete seguidor durante la extrusión permanece con todas las impurezas con forma de cilindro, el cual es retirado después de cada extrusión. Es importante tener el cojinete seguidor en el centro del contenedor, para producir una cáscara con un espesor de pared constante.

Maquinado de tochos

En cierto grado, las impurezas superficiales y las capas de óxido pueden ser removidas por medio de un maquinado que no debe ser necesariamente de mucha calidad, semejante al de la superficie de fundición de un tocho. El éxito de este método se limita a la oxidación que sufre la superficie maquinada durante el calentado del tocho, que depende de la atmósfera y de la duración del calentado.

Extrusión con gran cantidad de desecho

En este método, se intermite la extrusión antes de que el defecto aparezca, dejando por tanto, una gran cantidad de desecho que puede llegar a ser mayor al 30% de la longitud del tocho. Este método generalmente tiene éxito, pero es costoso. Sin

embargo, es preferible la extrusión con menor cantidad de desecho y el uso de pruebas para determinar el punto de inicio del defecto.

Temperaturas similares del tocho y del contenedor.

Se ha aplicado con éxito cuando el patrón de flujo C es causado por un gradiente de temperatura. Sin embargo, este método sólo sirve a temperaturas máximas de 450 °C, ya que no es posible igualar perfectamente las temperaturas en el caso de metales que tienen que extruirse a altas temperaturas, porque el material del contenedor no puede soportar esas temperaturas por un período largo de tiempo.

Algunos resultados han demostrado que un incremento en la temperatura del contenedor reduce el patrón de flujo C.

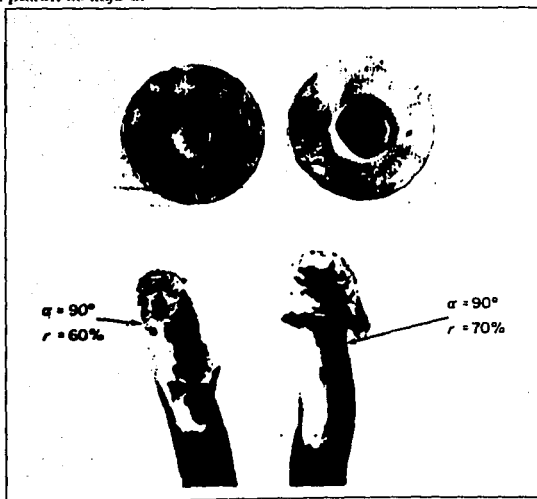


fig.18 Defecto de tubo en la extrusión.

4. Formación de incrustaciones y burbujas

Son defectos cercanos a la superficie, que se desarrollan si existen patrones de flujo A o B durante la deformación. Este tipo de defecto se presenta cuando la superficie del tocho fluye hacia el centro, siguiendo la zona muerta, y entra a la zona de deformación. Si existen impurezas, óxidos o lubricante en la superficie, pequeñas partículas o capas enteras son arrastradas; y lo peor de todo, es que pueden quedar atrapadas bajo la superficie de la extrusión.

Dependiendo del número y tipos de material atrapado, se observarán incrustaciones con forma de espigas o de hojuelas en la superficie de extrusión; o bien, con forma de líneas o burbujas si las impurezas, por ejemplo de un lubricante, generan gas a la temperatura de deformación. Algunas veces las burbujas no aparecen inmediatamente, sino después de un tratamiento térmico.

Como el defecto de incrustaciones aparece generalmente en la extrusión con patrones de flujo A y B, este defecto también se presenta en la extrusión inversa.

Presentamos tres métodos que tienden a impedir que el flujo de la superficie del tocho vaya hacia la zona central de deformación: extrusión sin lubricante y con dados planos, extrusión con cáscara y extrusión con lubricante y con dado cónico.

Extrusión sin lubricante y con dados planos

La extrusión sin un lubricante elimina la posibilidad de inclusiones de lubricante, pero incrementa la fricción entre el tocho y el contenedor. Esto limita el movimiento de la superficie del tocho a la pared del contenedor y no puede fluir hacia la extrusión, por tanto, el resto del material fluye por debajo de la superficie del tocho por deformación cortante y la capa superficial del tocho que contiene todas las impurezas, se acumula enfrente del dado. Este método es semejante a la extrusión con cáscara.

Extrusión con cáscara

Si continúan apareciendo incrustaciones y burbujas aún cuando no se usó ningún lubricante, se puede utilizar la extrusión con cáscara.

Extrusión con lubricante y con un dado cónico

Una alternativa a los métodos antes mencionados es el de reducir la zona muerta hasta que no exista la posibilidad de que la superficie del tocho fluya hacia la extrusión. Esto puede lograrse usando un buen lubricante en el contenedor y en el dado. Los dados cónicos son también utilizados para extrusión con un lubricante, porque incrementan la homogeneidad de flujo.

La aparición de burbujas nunca será completamente eliminada. Se necesita una mayor experimentación para determinar el ángulo óptimo para una aleación dada, y sus parámetros de extrusión.

5. Variaciones en la estructura a lo largo de la extrusión y a lo largo de la sección transversal del producto.

Idealmente, el producto extruido debe tener la misma estructura a través de su longitud y sección transversal, con propiedades uniformes. Sin embargo, la naturaleza no homogénea del flujo en el contenedor resulta, en distinto grado, en lo siguiente:

- La periferia de la zona de la extrusión es sometida a una deformación más severa que la zona central debido al efecto de la fricción y al del esfuerzo cortante.
- La deformación causada por la fricción y el esfuerzo cortante se incrementa hacia el extremo final de la extrusión, y por tanto, abarca una mayor fracción de la sección transversal.
- La deformación cortante en la zona de la periferia y al final de la extrusión resultan en un incremento de la temperatura por arriba de otras partes del tocho deformado.

En la mayoría de los casos, en la extrusión en caliente la estructura de fundición es removida por recristalización. La recristalización que tiene lugar durante la deformación (recristalización dinámica) y la distribución resultante del tamaño de grano dependen del esfuerzo, cantidad de esfuerzo y distribución de temperatura en la zona de deformación y en la extrusión producida. Así, las diferencias estructurales y los defectos pueden explicarse como variaciones de estos parámetros, al menos en cierto grado. Sin embargo, las distintas aleaciones mostrarán distintos fenómenos, de acuerdo a su temperatura de recristalización.

6. Esfuerzo de cedencia a la entrada o salida de la zona del dado.

En la extrusión con dado abierto, si la presión aplicada tiene un valor muy superior al valor del punto de cedencia del material, el flujo del tocho será detenido por el dado y por la acumulación de material a la entrada, originando el denominado "abarrilamiento". Otro problema que puede presentarse en esta situación radica en saber cuál será longitud del tocho que puede ser extruido sin sufrir pandeo, aunque el pandeo del tocho puede controlarse con un complicado diseño de apoyos.

En la extrusión convencional se previene el abarrilamiento y el pandeo manteniendo el tocho en una cámara; sin embargo, la fricción con las paredes de la cámara incrementa el esfuerzo requerido para la extrusión. En la extrusión hidrostática el abarrilamiento y el pandeo son evitados porque la presión que los controla es proporcionada hidrostáticamente por el líquido que rodea completamente al tocho.

7. Defectos en el perfil

Cuando la superficie del dado es rugosa o está gastada, o cuando se usa un lubricante que no es el óptimo, la superficie de el producto terminado es irregular.

También, si se le da demasiado uso al dado, pueden producirse cambios dimensionales al producto.

Un defecto muy común es que el producto presente un perfil tipo banana o de combadura, cuando el producto extruido debiera ser de perfil recto. Para un producto con un perfil complicado, la posición de la entrada del dado es importante para que el producto salga recto. También es importante el diseño de la entrada del dado. El fabricante de herramientas, durante la producción de un dado, debe hacer ligeros cambios en la entrada del dado para lograr el ajuste final para el control de la rectitud del producto.

Otras causas que producen combaduras en el producto son: una distribución de temperatura no uniforme en la extrusión en caliente, variaciones en la distribución del lubricante e irregularidades en el material.

Para obtener nuevamente el perfil recto en el producto, se emplean dos prácticas que son muy comunes: la primera es eslar el producto ligeramente por arriba de su límite elástico; el segundo es el de laminarlo a través de una sucesión de rodillos.

8. Defecto de estallamiento central.

Se presenta cuando se fractura el centro del tocho en lugar de la piel, y la piel tiende a fluir más rápido que el material del centro. Es un defecto común durante la extrusión, y consiste en una separación de una pared central en el interior de la extrusión limitada por una fractura que ocurre sobre una región cilíndrica. La fractura central también puede ser de formas complicadas y puede presentarse repetidamente a lo largo de la extrusión.

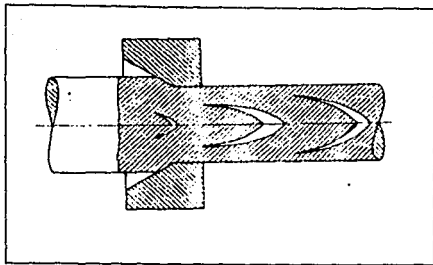


fig. 19 Defecto de estallamiento central.

Las principales variables independientes en el proceso de extrusión son la reducción, el ángulo del dado, la fricción y las propiedades del material. Los productos con el defecto de estallamiento central aparecen sólo cuando se desarrolla una combinación de estas variables durante el proceso.

En la siguiente figura se esquematiza el proceso de extrusión cuando ocurre el estallamiento central. Observamos que la zona plástica es de forma anular y que no se extiende hasta el eje de simetría; ya que alrededor del eje de simetría, las dos regiones rígidas: la zona I que corresponde al material sin deformación y la zona III que corresponde al producto totalmente deformado, tienen una frontera común. Debido a que la zona III se mueve más rápido que la zona I, éstas se ven forzadas a separarse y a formar la zona de estallamiento central.

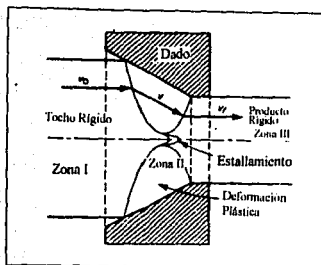


fig. 20 Proceso de extrusión cuando se presenta el defecto de estallamiento central.

Experimentalmente se ha determinado que para prevenir en algunos casos el estallamiento central hay que redondear la esquina que forman la parte cónica y cilíndrica del dado.

9. Formación de una zona de metal muerto, abombamiento y contracción en la boca de entrada del dado. (extrusión hidrostática)

Se sabe que el patrón de flujo varía de acuerdo al ángulo del dado y a la reducción utilizados. Por ejemplo, cuando se usa un ángulo de dado $\alpha = 30^\circ$ para una reducción de 5 a 90% durante extrusión hidrostática, la situación es como sigue: para pequeñas reducciones (digamos de 5 a 10%), se forma un abombamiento o zona muerta, cuya cantidad disminuirá conforme se incremente la reducción. Para reducciones un poco grandes, podemos observar una contracción, aún antes de que el abombamiento haya sido totalmente eliminado. Para reducciones realmente grandes, la contracción llega a ser predominante. Con ángulos de dado pequeños, la contracción comienza con pequeñas reducciones, y la formación de la zona de metal muerto se elimina rápidamente, mientras que lo contrario se cumple para ángulos de dado grandes.

Finalmente, para ángulos de 80, 85 y 90° con una reducción muy pequeña (digamos $r=5\%$), el abombamiento adquiere forma de virutas o astillas ya que el dado actúa sobre el tocho como si fuera una herramienta de corte. Este fenómeno es utilizado para desbastar y remover una superficie no deseada. En la extrusión hidrostática, la zona de metal muerto es separada del producto y permanece en el contenedor después de que el tocho entero ha sido extruido.

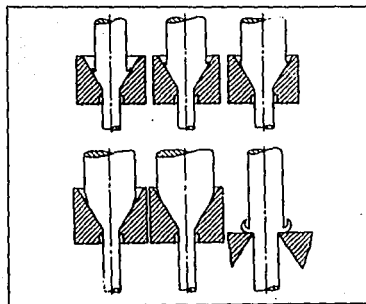


fig.21 Defecto de zona de metal muerto, abombamiento y contracción en la entrada del dado.

10. Fractura en materiales frágiles

En la extrusión hidrostática la fractura total generalmente se presenta en materiales duros y quebradizos, la cual puede prevenirse si se aplica presión en la cámara a la salida de la extrusión. Se ha determinado que aún sin la aplicación de dicha presión, la fractura puede evitarse seleccionando la reducción apropiada; también, una correcta selección del ángulo del dado ayuda a que el tocho fluya plásticamente sin fracturarse.

11. Distorsión.

Existe distorsión en cierto grado aún en los flujos de extrusión más uniformes y que no presentan ninguno de los defectos más serios asociados con fractura y rompimiento. Se han desarrollado profundos estudios experimentales acerca de los patrones de flujo mediante el uso de métodos de viscoplasticidad (2). Para extrusión (3), el tocho es dividido en dos partes iguales, y en una de las mitades es grabada o marcada mecánicamente una cuadrícula. Las dos mitades son ensambladas y extruidas como si fuera un sólo tocho. Los resultados se muestran en la siguiente figura.

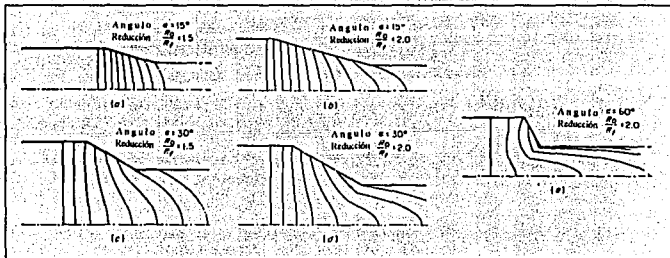


fig. 22 Defecto de Distorsión. Se muestran varios de los patrones de flujo.

Se ha concluido que a mayor ángulo de dado, mayor la distorsión; y que mayores reducciones también causan una mayor distorsión.

12. Formación de cavidad.

Este defecto se presenta durante la última etapa de la extrusión en frío o por impacto, cuando el espesor del tocho se ha reducido aproximadamente igual al espesor del producto. Un análisis más detallado para la predicción de este defecto la da Kudo (4).

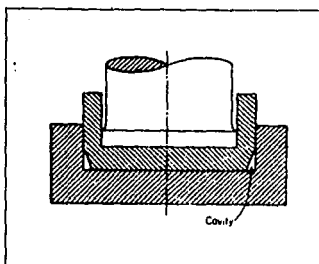


fig. 23 Defecto de cavidad.

REF.

- (1) Avitzur, Betzalel, Analysis of Central Bursting Defects in Extrusion and Wire Drawing, ASME Paper 67, Prod.5. To be published in the Transactions.
- (2) Thomsen, E.G., Yang C.T., Kobayashi S., Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing, The Macmillan Company, New York, 1965.
- (3) Thomsen, E.G., Yang, C.T., Bierbower, T.B., An Experimental Investigation of the Mechanics of Plastic Deformation of Metals, Univ. Calif. (Berkeley) Publ. Eng., vol 5, no.4, 1954.
- (4) Kudo, H., Some Analytical and Experimental Studies of Axisymmetric Cold Forging and Extrusion, Parts I and II, Intern.J. Mech. Sci., vol.2, 1960.

CAPITULO II

METODO EXPERIMENTAL

A. Antecedentes del Zinalco.

El zinalco es una aleación de reciente desarrollo que surge tras varios años de estudio y caracterización de propiedades en el Instituto de Investigaciones en Materiales (I.I.M.) de la Universidad Nacional Autónoma de México como resultado de un programa de investigación iniciado en 1978 y auspiciado por la OEA.

El principal componente de la aleación es el zinc, ya que lo contiene en aproximadamente 77 p/o ; junto con aluminio y cobre en 21 p/o y 2 p/o respectivamente. Debido a que México es uno de los países con mayor producción de zinc a nivel mundial (sexto productor mundial en 1991 con 25,140 tm) el zinalco ya está presente en forma comercial en el mercado a precios altamente competitivos con respecto a los metales y otras aleaciones.

En el zinalco se conjuntan tanto una excelente resistencia a la corrosión, que es semejante a la del aluminio, y la resistencia mecánica de un acero bajo en carbono; combinado con una densidad intermedia del aluminio y acero; ya que pesa el doble que el aluminio, pero es 31% más ligero que el acero.

Como resultado de sus propiedades, el zinc es un material estructural con el que puede fabricarse una extraordinaria variedad de productos mediante procesos convencionales de transformación; así como sustituto de materiales tradicionales como aluminio, bronce, hierro gris, latón, zamak y hasta acero.

B. Propiedades del zinc.

El zinc es un material extraordinario debido a las notables propiedades que presenta, lo que ha provocado un intenso desarrollo en una amplia gama de aplicaciones, pero todavía permanecen muchas otras sin explorar.

A continuación mostramos las propiedades más sobresalientes del zinc:

- Un amplio intervalo de solidificación que se extiende de 421°C a 481°C ; que representa un bajo punto de fusión comparado con los del aluminio, bronce, latón y hierro gris.
- Su densidad intermedia entre la del acero y del aluminio ($5.4 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$).
- Su coeficiente de expansión térmica semejante al del aluminio ($25 \mu\text{m/mm}^{\circ}\text{K}$).
- Una buena resistencia a la corrosión, intermedia entre el aluminio y el zinc. Pruebas realizadas en cámara salina, muestran que el zinc forma una película de óxidos protectores formada principalmente por Al_2O_3 , que evitan una corrosión progresiva; y en presencia de SO_2 en el ambiente, el zinc presenta una clara pasivación, mientras que el aluminio 380 sufre un severo ataque.
- Una excelente maquinabilidad, muy semejante a la del latón empleado para maquinado rápido (Cu-33Zn-3.2Pb).
- Una buena conductividad eléctrica.
- Su superplasticidad; que ha sido uno de los descubrimientos más sobresalientes en la ciencia de los materiales de los últimos años.

La superplasticidad es una propiedad que presentan ciertas aleaciones metálicas debido a su comportamiento similar al de los plásticos, y consiste en que se pueden deformar en varios cientos por ciento sin fracturarse. Esta deformación es permanente, ya que al quitar la carga, el metal no recupera su forma original. Sin embargo, aún no conocemos una respuesta definitiva que nos explique por qué un metal se comporta superplásticamente.

Experimentos realizados nos indican que la aleación debe poseer una microestructura de granos muy finos, de tamaño menor a $10 \mu\text{m}$. Las teorías de Ashby (1) y Mc Lean (2) suponen que la deformación ocurre principalmente por los deslizamientos de unos granos sobre otros.

La superplasticidad de una aleación Zn-Al sólo se presenta a temperaturas por encima de los 200°C y a temperatura ambiente la aleación no puede deformarse sino hasta un 15%, pero debido a la adición de cobre a la aleación eutécticoide Zn-Al (ZnAlCo), se incrementa sorprendentemente su ductilidad a temperatura ambiente, al mismo tiempo que su resistencia mecánica.

-Su magnífica soldabilidad con aleaciones a base zinc que no requieren de una alta tecnología para usarse, ya que su aplicación es semejante a la de soldadura estaño-plomo y requiere equipo relativamente barato. En otros estudios realizados, se mostró que esta soldadura se difunde sin problemas en la aleación, debido al gran número de fronteras de grano presentes en las aleaciones superplásticas, proporcionando una elevada resistencia mecánica a la unión. Lo anterior representa otra ventaja sobre el aluminio.

-Su alta resistencia mecánica (380-410 MPa), semejante a un acero bajo en carbono.

MATERIAL PROPIEDAD	ZINALCO I				ZINALCO II		ZAMAK	ALUMINIO	LATON	BRONCE	BIERRO
	FUNDICION EN ARENA	FUNDICION EN OXIGEN	EXTENDIDO	LAMINADO	FUNDICION EN ARENA	FUNDICION EN OXIGEN	5	380			GRIS
TIPO DE MOLDEO											
DENSIDAD	5.4				5.4		6.7	2.74	8.5	8.82	7.4
PUNTO DE FUSION (°C)	421-481				421-481		360- 380	540- 595	925- 940	792	1232
CORFICIENTE DE EXPANSION TERMICA (1/°C)	20				20		26.9	21.8	20	18.5	11.8
CONDUCTIVIDAD TERMICA(W/CM°K)	120				120		132	96	90	47	---
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (M.A.C.S.)	.38				.38		.25	.27	.20	.10	.5
RESISTENCIA A LA TENSION (MPa)	280-300	310- 320	380- 410	270- 290	350- 380	400- 420	280- 330	324	230	240	214
RESILIEZO DE CEDENCIA (MJ/M ²)	280-330	290- 310	280- 320	300- 310	260- 270	340- 370	---	158	117	124	124
DEFORMACION MAX. (%)	3-6	8-10	30-35	80-100	5-8	6-10	7	3.5	30	20	2
DUREZA HB	50-56	60-65	40-35	25-30	65-80	55-70	80-85	80-85	60	65	210
RESISTENCIA AL IMPACTO (J)	2-3	2-3	7-8	8-9	2-3	2-3	50-60	2-3	15	15	54-80
MODULO DE ELASTICIDAD (GPa)	110-130				110-130		---	71	90	80	172

Fig. 24 TABLA DE PROPIEDADES DEL ZINALCO I, ZINALCO II, ALUMINIO, ZAMAK 5, ALUMINIO 380, LATON, BRONCE Y FIERRO GRIS.

C. Proceso de extrusión del zinco.

El zinco que mejor se comporta a la extrusión es el zinco I; ya que el zinco II requiere una mayor carga para ser extruido, debido a que tiene una resistencia mecánica superior a la versión uno y no pierde sus propiedades mecánicas tan rápidamente con la temperatura, pudiéndose extender su temperatura de trabajo hasta los 150°C.

El lingote más apropiado para el proceso de extrusión es el preparado por colada semicontinua, debido a que este método produce una estructura de dendritas finas apropiadas para lograr una estructura uniforme. Las desventajas que se tienen al no emplear lingotes obtenidos por colada semicontinua son: una mayor carga de extrusión (aproximadamente 15% más), existencia de inclusiones que deterioran la apariencia superficial y rayan los dados, y un aumento de la fricción en la cámara de extrusión por las asperezas de la superficie.

Otro método apropiado es el de molde permanente de cobre con refrigeración, que da una aceptable estructura para extrusión. Independientemente del método que se haya empleado, la estructura obtenida por fundición está compuesta por dendritas de una solución sólida de aluminio, líquido interdendrítico formado por las fases metaestables de solución sólida de zinc y de aluminio y pequeñas cantidades de fase CuZn_{15} estable. Estas fases metaestables tienden a las composiciones estables de aluminio y zinc durante el proceso termomecánico de la extrusión. (3)

La presión de extrusión está dada por:

$$P = C / A_0 = k L D (A_0 / A)$$

En donde: C = carga en toneladas

A_0 = Área transversal del lingote en mm^2

A = Área transversal del perfil en mm^2

k = Constante de extrusión en Kg/mm^2

La constante k debería ser igual al esfuerzo de cedencia del material a extruir (2.5 kg/mm^2 para el zincalco); sin embargo, la fricción, la temperatura y el tipo de máquina influyen en su valor real, llevándolo a ser mucho mayor. En el zincalco, el valor experimental medido a nivel industrial, como promedio de más de 150 extrusiones a nivel industrial oscila entre 16 y 20 kg/mm^2 . El mínimo se obtuvo con buena lubricación y en lingotes homogeneizados. En el laboratorio, bajo condiciones controladas ha sido posible llegar hasta un valor de 5 kg/mm^2 . El valor de $k=20$ es realmente muy alto, se da en las aleaciones de aluminio de alta resistencia. Con una mayor experiencia en la extrusión industrial del zincalco es posible que este valor se disminuya hasta 10 ó 12.

En cuanto a la velocidad de extrusión podemos decir que el zincalco es un material muy sensible a la rapidez con la cual se deforme, a mayor rapidez menor deformación y mayor resistencia. La velocidad de extrusión está limitada en el zincalco a velocidades de entre 6 y 10 metros por minuto. Algunas de las razones de esta limitación son: la sensibilidad del material a la rapidez de deformación y el aumento de la temperatura del metal durante el transcurso de la extrusión. La velocidad puede ser mayor en cuanto menor sea la temperatura de extrusión.

Por otro lado, la temperatura que se ha manejado para la extrusión debe estar entre $230 \pm 20^\circ\text{C}$. Se ha observado que la carga de extrusión disminuye conforme se aumenta la temperatura hasta los 280°C ; ya que a mayor temperatura la carga vuelve a subir debido a la aparición de nuevas fases arriba de esta temperatura(3). A temperaturas mayores de los 310°C , la carga vuelve a disminuir con la temperatura, pero el material se desmorona al salir del dado. El efecto anterior se debe a que se comienza a reblandecer una capa que existe entre los granos del material, con composición eutéctica que tiene punto de fusión de 386°C .

Los principales problemas presentados durante la extrusión del zinco, que son: la distorsión de los perfiles, la fricción y la baja velocidad de extrusión se originan en el dado. La experiencia ha demostrado que un dado para extruir aluminio, cobre o latón no es totalmente adecuado para extruir zinco.

La fricción observada entre el zinco y un dado de acero, eleva la temperatura $30 \pm 3^\circ\text{C}$ a una velocidad de extrusión de entre 6 y 10 metros por minuto. La elevación de la temperatura ocurre únicamente cerca de la superficie y en un periodo de tiempo muy corto de unos 10 milisegundos, originando que una capa muy superficial del perfil eleve su temperatura por arriba de la temperatura eutéctica (276°C) sufriendo una transformación de fase (3). El centro del perfil no cambia de fase.

El dado de cara plana, muestra la menor presión de extrusión cuando no se utilizan lubricantes. Un ángulo de 80° a 110 grados nos reduce la carga en el caso de extruir con lubricante. En este caso, la superficie del tocho deberá estar maquinada, ya que ésta sale junto con el perfil, reduciendo la calidad del perfil extruido. Para reducir este efecto es posible usar un dado con ángulo de entrada entre 120° y 130 grados.

La estructura del metal transformado depende de la relación de extrusión. Una relación baja, entre 4 y 10 no permite la total transformación de la estructura de fundición metaestable a la estructura con las fases estables. Con relaciones arriba de 10 la transformación se logra completamente.

$$\begin{aligned} \text{Relación de Extrusión} &= (16\text{cm} \times 16\text{cm}) / (5\text{cm} \times 5\text{cm}) \\ &= 256 \text{ cm}^2 / 25 \text{ cm}^2 \\ &= 10.24 \end{aligned}$$

Cuando las dimensiones finales de un perfil extruido requieren de una precisión superior a 0.1 mm, es necesario terminar el perfil dándole una ligera pasada de reducción, a través de un dado con la figura y las dimensiones adecuadas. En esta forma se mejora

el acabado superficial y se llenan las tolerancias dimensionales que no se pueden dar por extrusión. Estas reducciones de área normalmente están entre 5 y 10%. En el caso de requerirse tan sólo enderezar, el perfil se debe estirar entre 1 y 2%. En el caso del zinco no se obtiene un aumento en la dureza por deformación.

A continuación presentamos la secuencia de pasos para el proceso de la extrusión del zinco:

1. Lingotes preparados por colada continua o molde permanente refrigerado, con una longitud de 3 a 4 veces su diámetro, se calientan a $230 \pm 20^\circ\text{C}$. La temperatura se debe medir y controlar por medio de termopares de contacto.
2. Calentar las herramientas a 200°C y la cámara de extrusión a 180°C .
3. Dependiendo de la relación de extrusión y el diámetro del lingote se puede conocer aproximadamente la carga requerida para el inicio de la extrusión. La velocidad de extrusión es entre 6 y 10 metros por minuto.
4. Enfriar el perfil con aire comprimido dirigido hacia la boca del dado o utilizar ventiladores directamente sobre el perfil. La ventilación deberá ser tal que el perfil alcance una temperatura por debajo de 200°C a una distancia de un metro con respecto a la salida de la máquina.
5. La mesa por donde corre el perfil extruido es preferible que sea una banda transportadora continua, en esta forma se evita que el perfil caliente se deforme por efecto de su propio peso.
6. El proceso de enderezado por estiramiento o de corrección con dado de los perfiles, se lleva a cabo cuando los perfiles estén completamente fríos, ya que si se estiran en caliente se corre el peligro de inducir cuellos a lo largo del perfil.
7. El corte de los perfiles se logra sin distorsión usando discos de corte de carburo de silicio o diamantados, girando a 1200 r.p.m.

D.Descripción del equipo utilizado.

El análisis realizado se llevó a cabo a partir tres muestras de dos barras de ZnAlco extruido; dos de las muestras corresponden a una sola extrusión de sección transversal circular; pero una es del extremo inicial y otra del extremo final. La tercera muestra corresponde al extremo inicial de una extrusión de sección transversal cuadrada.

A continuación se describe el equipo utilizado y la secuencia de operaciones que realizamos para medidas de la distorsión, para obtener las muestras de trabajo para las pruebas de dureza, para el análisis metalográfico, y para fotografía de microestructuras en el microscopio electrónico de barrido (M.E.B.).

1.Medidas de la distorsión.

Por distorsión nos debemos referir a las diferencias geométricas que presentan los perfiles de las muestras resultantes de la extrusión, con respecto al perfil deseado, es decir, respecto al perfil que supuestamente debimos obtener con el dado utilizado.

Por medio de un vernier realizamos las medidas de la sección transversal de las muestras de trabajo. Para las muestras de perfil circular tomamos las medidas de dos diámetros perpendiculares por cada muestra; mientras que para la muestra de perfil cuadrado, tomamos las medidas de su ancho y altura.

Con estas mediciones, podremos hacer la comparación del perfil obtenido en la extrusión con el perfil deseado, y observar las posibles diferencias dimensionales y geométricas que se presenten.

2. Seccionado de muestras.

El objetivo del seccionado es el de obtener a partir de grandes muestras, unas muestras que tengan un tamaño conveniente y que sean representativas, para que podamos trabajar adecuadamente.

Utilizamos una cortadora con disco abrasivo, que es el método más ampliamente utilizado en seccionado para investigaciones en materiales, ya que esta herramienta no provoca cambios en la composición de la muestra. La zona del corte se enfría con una mezcla de agua con aditivos; además, este método es rápido, preciso y económico.

Utilizamos una cortadora Buehler Ltd., que se encuentra en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

De cada uno de los tres segmentos de barras, se cortaron a lo largo de la sección transversal, a manera de rebanadas de aproximadamente dos milímetros de espesor, dos muestras representativas de cada uno de los casos.

Este método puede llegar a introducir esfuerzos hasta una profundidad de $100\ \mu\text{m}$ provocando estructuras falsas, que deberán ser eliminados con el pulido grueso y fino que veremos más adelante.

3. Prueba de dureza.

El propósito de esta prueba, es el de poder determinar si esta propiedad se mantiene constante o cambia a lo largo de la sección transversal de cada una las muestras extruidas, y también, realizar la comparación de las durezas medidas en la muestra de perfil circular del inicio de la extrusión, con respecto a las de la muestra del extremo final de la extrusión.

La dureza está definida como la resistencia que opone un metal a la penetración de su superficie, o también, esta propiedad es una medida de su resistencia a la deformación permanente.

En esta prueba, se aplica durante cierto tiempo un penetrador sobre la muestra, la cual yace sobre una plataforma rígida. El penetrador tiene una geometría determinada, y está bajo la acción de una carga constante conocida que se aplica directamente o por medio de un sistema de palanca. El penetrador ocasiona sobre la superficie del material una deformación permanente con la forma de la punta (cono de diamante o bolas de diferentes diámetros con diferentes cargas) dependiendo de la prueba de dureza o escala que se use. La medida de la dureza está dada en base a las dimensiones de la huella, ya sea de profundidad; o bien, de área, dependiendo del método de prueba.

Dureza Rockwell.

Para este caso, realizamos las mediciones con el ensayo de dureza Rockwell en la escala B, que es una de las pruebas de uso más generalizado y se aplica para materiales de dureza media, como es el caso del zincalco. Las especificaciones para esta prueba son: penetrador de bola de 1/16 de pulgada y 100 kg de carga.

Utilizamos un durómetro Misawa Selki Selsakusho modelo No.3R que se encuentra en los laboratorios del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

En esta prueba de dureza se cuenta con un dispositivo de lectura directa. La prueba consiste en elevar la muestra lentamente contra el penetrador hasta que se ha aplicado una precarga de 10 kg, esto se indica en el disco medidor al coincidir la aguja pequeña con el punto de precarga. Ajustamos nuestra referencia en 0 (cero) con la aguja grande girando el plato exterior del disco medidor. Luego se aplica la carga de 100 kg a través de un sistema de palanca de carga. Después de que la aguja se detiene, se quita la

carga mayor, y el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor en la escala B.

Lo que medimos en realidad es la distancia de separación entre dos posiciones sucesivas, la primera posición corresponde al penetrador sometido a la precarga de 10 kg y la segunda al penetrador a una carga de 100 kg, lo que elimina los errores debidos a irregularidades en la superficie de las muestras.

En esta prueba, trabajamos con una muestra representativa de cada una de los tres segmentos proporcionadas que previamente fueron seccionadas con la coriadora de disco abrasivo. Estas muestras fueron sometidas únicamente a un pulido grueso, con el fin de eliminar rayaduras; iniciando el lijado con lija número 320, seguida por 400 y 600.

Por cada una de las muestras de perfil circular tomamos 21 mediciones a lo largo de dos diámetros perpendiculares. Para la muestra de perfil cuadrado tomamos 20 mediciones, a lo largo de sus dos diagonales. Las pruebas se hicieron a partir del centro, con una separación de 5 mm. Se hizo un promedio para obtener un mapeo a partir del centro de la sección transversal hasta las orillas de cada una de las muestras, así como un promedio total por cada muestra.

Dureza Vickers.

Para este caso, el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de 136° entre las caras opuestas. El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 1000 gr. El microdurómetro empleado fue uno de marca Shimadzu, Modelo Dataletty 150, con un rango de cargas de 25 a 1000 gr. Nuestras mediciones las realizamos con una carga de 200 gr. En el probador de dureza Vickers, los números se expresan en términos de carga y área de la impresión. Como resultado de la forma del marcador, la impresión sobre la superficie de la muestra será un

cuadrado. La longitud de la diagonal del cuadrado es medida por medio de un microscopio equipado con un microdurómetro ocular que contiene fillos móviles. La distancia entre los fillos se indica en un contador calibrado en milésimas de milímetro. Por lo general hay tablas para convertir la diagonal medida al número de dureza piramidal Vickers (HV), o por medio de la fórmula:

$$HV = \frac{1,854 \times L}{d^2}$$

donde: L = carga aplicada en gr. = 200 gr.

d = longitud promedio de la diagonal del cuadrado de la impresión, en μm .

Realizamos las mediciones de microdureza en las tres muestras de trabajo (circular del inicio de la extrusión, circular del final de la extrusión y de la de perfil cuadrado) en la zona cercana a la capa superficial en la sección transversal, debido a que es considerada una zona fundamental para este estudio.

Algunos de los factores que influyen en la exactitud de cualquier prueba de dureza por indentación son:

Condición del marcador de muescas. El achatamiento de la bola de acero de un marcador producirá errores en el número de dureza; en cuyo caso la bola debe ser revisada frecuentemente para detectar cualquier deformación permanente y debe descartarse cuando ocurra tal deformación. Los marcadores de diamante deben revisarse en busca de cualquier señal de asillado.

Exactitud de la carga o del esfuerzo aplicado. El probador debe aplicar cargas dentro del intervalo establecido con errores mínimos. Las cargas mayores a la cantidad recomendada no deben utilizarse para obtener así pruebas exactas.

Condición de la superficie de la muestra. La superficie de la muestra sobre la cual se va a tomar la lectura de dureza debe ser plana y representativa del material en buen estado.

Cualquier óxido, costra o grasa debe eliminarse por esmerinado ó pulido.

Espesor de la muestra. La muestra debe ser suficientemente gruesa de modo que no aparezca alguna protuberancia sobre la superficie opuesta a la de la impresión. El espesor de la muestra recomendado es de por lo menos diez veces la profundidad de la impresión.

Localización de las impresiones. Las impresiones deben estar al menos 2.5 diámetros de distancia del borde de la muestra y separadas al menos 5 diámetros cuando se utilicen bolas para la prueba de dureza.

La prueba de dureza Rockwell es una operación rápida y sencilla. Como las cargas y los indentados o marcadores no son muy grandes, puede emplearse en muestras delgadas y probarse tanto los materiales más duros como los más blandos. Por otro lado, el probador Vickers es el más sensible de los probadores utilizados en la producción industrial. Debido a la posibilidad de usar cargas ligeras, pueden probarse partes muy pequeñas y secciones muy delgadas y la impresión cuadrada es la más fácil de medir con exactitud.

4. Preparación y pulido de las muestras para análisis metalográfico.

Presentamos la secuencia que se siguió para preparar las muestras que serán observadas en el microscopio electrónico de barrido. Esta secuencia nos debe llevar a obtener unas muestras representativas de lo que queremos observar, con mínimas distorsiones causadas por el proceso, libres de rayaduras, picaduras y sin manchas debidas a líquidos, y lo suficientemente planas para que nos permitan observar la microestructura desde el centro hasta las orillas de cada una de las secciones transversales.

-De cada una de las muestras que cortamos a manera de rebanadas, de las de perfil circular cortamos 8 muestras de aproximadamente 0.6 cm X 0.6 cm a lo largo de un diámetro, y de la muestra de perfil cuadrado, cortamos 8 muestras de aproximadamente 0.6 cm X 0.6 cm a lo largo de su eje horizontal. Estos cortes se realizan con disco abrasivo.

-Pulido grueso. Con el objeto de eliminar progresivamente irregularidades y rayaduras que son introducidas a la muestra por la herramienta de corte, se inicia el pulido con la lija más gruesa que permita producir rayaduras más finas que las existentes. Como nuestros cortes los hicimos con disco abrasivo, iniciamos el proceso con lija de grado 320, seguida de lijas 400 y 600.

-Pulido fino. Es el último paso para obtener una superficie plana libre de rayaduras, que muestre un acabado "espejo". Consiste en que después del pulido con lija de grado 600, pulimos la superficie de la muestra en un paño de diamante al que se le agrega una suspensión abrasiva, que en este caso es pasta de diamante. El paño está fijo en un disco de aluminio que gira rápidamente por medio de un motor eléctrico. La muestra se mantiene manualmente en contacto con el disco hasta obtener la superficie deseada. La pasta de diamante es soluble en aceite y se puede conseguir en grados hasta de 0.25 μm . Nosotros empleamos discos con pasta de diamante de 0.5 μm y 0.3 μm .

-A continuación del pulido fino, las muestras con acabado "espejo" son lavadas en acetona por un período que varía de 1 a 5 minutos, para eliminar las impurezas superficiales que pudieran tener; como por ejemplo, aceite. Después, se lavan en agua, por un período de aproximadamente 4 minutos. En estos lavados debemos evitar todo contacto sobre la superficie pulida, de lo contrario, podríamos contaminarla y las microestructuras no serían correctas.

5. Fotografía de microestructuras en microscopio electrónico de barrido (M.E.B.).

En esta parte, realizamos las observaciones de las microestructuras de las muestras que previamente pulimos con acabado "espejo", lo que nos permitirá hacer una comparación entre las muestras y un análisis de los cambios que sufre la microestructura a lo largo de la sección transversal.

Para la observación y fotografía de las microestructuras, utilizamos un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-T20, que se encuentra en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Este microscopio tiene un rango de aumentos de 35x hasta 30000x, y un tamaño de muestra hasta de 10 mm de diámetro.

Consideramos interesante conocer el principio y funcionamiento del microscopio electrónico de barrido, por lo que hablaremos un poco sobre este tema.

En 1897 J.J. Thompson determinó el inicio de la óptica electrónica, gracias al descubrimiento de los electrones; en 1923 Louis de Broglie descubrió la mecánica ondulatoria de las partículas; y en 1926, Busch determinó la acción de los campos eléctricos y magnéticos sobre las partículas cargadas.

La idea de hacer un microscopio electrónico bajo estos principios fue sugerida por M. Knoll en 1935, y como resultado, M. von Ardenne construyó un M.E.B. para 1938, pero su resolución sólo superaba ligeramente la obtenida por el microscopio óptico. Se le hicieron entonces grandes mejoras al diseño, y fue hasta 1955, cuando C.W. Oatley y su equipo en Cambridge lograron una resolución similar a la que tuvieron los primeros microscopios electrónicos comerciales. El desarrollo del M.E.B. fue lento, pero una vez iniciado, creció enormemente. En 1955 se calcula que existían sólo dos o tres instrumentos; para 1965, cuando se introdujo el primer modelo comercial, había diez; y para 1970 había 500 microscopios en uso.

Los principales componentes de un M.E.B. son:

- a) Un emisor de electrones.
- b) Un dispositivo para enfocar un pequeño haz de electrones sobre la muestra.
- c) Un dispositivo para realizar el barrido con el haz de electrones sobre la superficie de la muestra.
- d) Un dispositivo que detecte la respuesta de la muestra.
- e) Un sistema de visualización.
- f) Un medio para transmitir la respuesta de la muestra al sistema de visualización.

Para comprender el funcionamiento del M.E.B. es de suma importancia conocer los efectos que se generan con la interacción del haz de electrones y la muestra; ya que al momento del contacto, algunos electrones chocarán y serán dispersados y otros penetrarán en la muestra. Existirá una respuesta distinta para cada emisión del haz de electrones, dependiendo en primer lugar de las colisiones electrón-átomo que se presenten, y en segundo lugar, de la distribución de los otros electrones en la muestra.

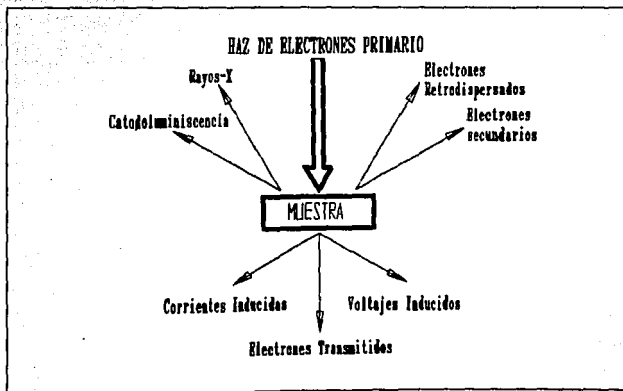


Fig. 25 INTERACCION DE LOS ELECTRONES CON LA MUESTRA

Al presentarse el contacto de los electrones con la muestra, se emiten principalmente electrones secundarios, rayos X, electrones retrodispersados, y en algunos casos fluorescencia. La magnitud de estos efectos depende de la constitución de la muestra; así, al ser detectados y transformados, pueden proporcionarnos información de la muestra al realizar imágenes morfológicas sobre una pantalla catódica.

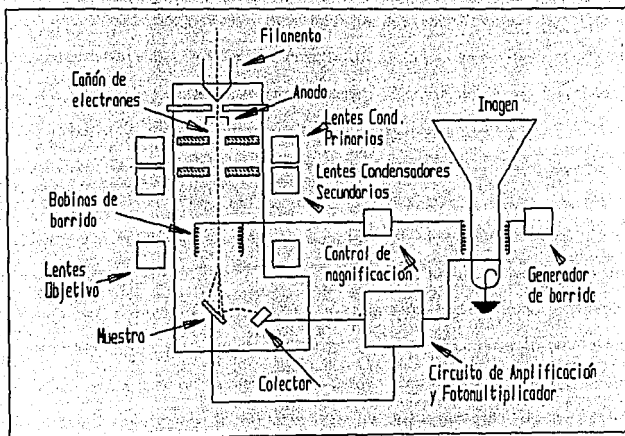


fig. 26: Diagrama de un Microscopio Electrónico de Barrido.

El M.E.B. es en apariencia mucho más grande y diferente al microscopio óptico, esto es debido a los suministros de potencia altamente regulada requeridos para producir y controlar el haz de electrones y a que el sistema completo debe mantenerse al alto vacío, ya que de otro modo, el aire interferiría con el movimiento de los electrones.

El microscopio consiste de un emisor de electrones, que está formado por un filamento de tungsteno calentado, que funciona como cátodo; y por un ánodo que acelera los electrones para formar el haz de alta velocidad.

El haz de electrones se concentra y focaliza por unas lentes electromagnéticas conocidas como las lentes del condensador. El propósito de esta lente es el de aumentar o disminuir el flujo electrónico al nivel de la muestra; esta focalización se hace a través de un diafragma de un milímetro de diámetro. Después de las lentes del condensador, los electrones pasan por otra lente electromagnética, denominada lente objetivo, que los enfoca a través de un diafragma de un diámetro aproximado a 10 nm.

La columna del M.E.B. también comprende bobinas de barrido, que deflecan el haz incidente con una trayectoria en forma de líneas muy cercanas entre sí, con la finalidad de que cubra por barridos la superficie de la muestra. Así, el haz barre la muestra de manera muy similar a como sucede en el tubo de rayos catódicos de un televisor. El aumento es modificado ajustando la corriente en las bobinas de barrido.

El modo normal de operación del M.E.B. consiste en coleccionar en un centellómetro (detector de emisiones de destellos por ciertos cuerpos al ser bombardeados por partículas alfa) los electrones secundarios emitidos por la superficie de la muestra como resultado del bombardeo electrónico; el centellómetro transforma la energía de los electrones secundarios en fotones luminosos los cuales pasan por un fotomultiplicador; y a la salida de éste, se emiten pulsos eléctricos que son enviados a un osciloscopio.

Una sincronización perfecta entre el barrido del haz de electrones y el barrido del osciloscopio permiten generar en cada punto de la pantalla fluorescente un punto luminoso cuya intensidad está ligada a la cantidad de electrones emitidos por la muestra.

Durante una operación normal del M.E.B. podemos obtener una resolución que nos permita observar partículas del orden de 100 Amstrongs; mientras que en condiciones especiales, partículas hasta de 5 Amstrongs.

La calidad de la imagen ha mejorado dramáticamente durante las últimas dos décadas debido a la reducción de ruido en los componentes electrónicos y al desarrollo de detectores más sensibles; así como a emisores de electrones más potentes, dispositivos de barrido más precisos y unidades procesadoras de imágenes más finas.

Las muestras que se observan en microscopía electrónica de barrido no requieren de una preparación complicada. Para obtener una buena imagen, se necesita una superficie libre de contaminación acabado "espejo", que sea resistente al alto vacío, y para evitar que se carguen eléctricamente, se usan adhesivos conductores, como son los pegamentos de plata o aluminio para asegurar la muestra al portamuestras.

Las ventajas del M.E.B. son:

- a) La capacidad de un amplio rango de aumentos.
- b) La facilidad de operación, y la posibilidad de efectuar experimentos dinámicos sobre la muestra.
- c) La posibilidad de hacer observaciones directas de la morfología externa de las muestras, así como de fracturas superficiales a un elevado aumento.
- d) La preparación de las muestras no es complicada.

Las limitaciones del M.E.B. son:

- a) Elevado costo.
- b) El ambiente de vacío.
- c) Incapacidad de mostrar detalles internos.
- d) La carencia de una respuesta a color.

Para este caso, para asegurar la muestra al portamuestras del microscopio, usamos como adhesivo pintura de plata. A continuación, se acciona el dispositivo que llevará el sistema al alto vacío, y una vez hecho esto, comienza el bombardeo de electrones. La imagen se visualiza en la pantalla fluorescente, seleccionamos la velocidad de barrido, la amplificación deseada; y procedemos a enfocar y a ajustar el contraste para fotografiar las microestructuras.

REF:

(1) cfr, Ashby, MF y RA Verral, Acta Met., 1973, 21, p.149.

(2) cfr, Mc Lean, D., Met Sci J., 1970, 4, p.144.

(3) cfr, Negrete S. Jesús, Extrusión de aleaciones Zn-Al-Cu, Tesis Doctoral, Dpto. de Física del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, 1994.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSION

A.RESULTADOS DE MEDIDAS DE LA DISTORSION.

Los resultados que obtuvimos de las 2 medidas de diámetros realizadas sobre las muestras de extrusión con perfil circular son las siguientes:

<i>MUESTRA CIRCULAR#1 (UNICO DE EXTRUSION)</i>	
Número de Prueba	Diámetro (mm.)
1	51.50
2	51.50
Promedio	51.50

<i>MUESTRA CIRCULAR#1 (UNICO DE EXTRUSION)</i>	
Número de Prueba	Diámetro(mm.)
1	51.24
2	51.26
Promedio	51.25

Los resultados obtenidos para la muestra de perfil cuadrado son los siguientes:

<i>MUESTRA DE PERFIL CUADRADO</i>	<i>MEDIDA DE LADOS DE LA MUESTRA</i>
Número de Prueba	(mm.)
1	50.31
2	50.29
Promedio	50.30

MUESTRA DE PERFIL CUADRADO	MEDIDA ENTRE CENTRO DE LADOS
Número de Prueba	(mm.)
1	51.60
2	51.71
Promedio	51.70

Podemos apreciar a partir de los resultados correspondientes a la extrusión de perfil circular, que existe entre ambas una diferencia en diámetros de 0.25 mm entre el inicio y el final de la extrusión y considerando el diámetro de perfil circular descado de dos pulgadas ó 5.08mm. Hay que recordar que los dados de extrusión empleados para estas barras son diseñados especialmente para extruir aluminio, con un diámetro de orificio en frío de 4.93mm ó 1.94 in. para obtener barras de aluminio con un diámetro final de 2in. Podemos determinar el porcentaje de variación con respecto al diámetro descado:

Inicio de la extrusión:

$$Er = \frac{(Dm - Dd)}{Dd} = \frac{(51.5 - 50.8)}{50.8} = \frac{0.7}{50.8} = 0.0137 = 1.37\%$$

Final de la extrusión:

$$Er = \frac{(Dm - Dd)}{Dd} = \frac{(51.25 - 50.8)}{50.8} = \frac{0.45}{50.8} = 0.0088 = 0.88\%$$

También, podemos determinar el porcentaje de variación de con respecto al orificio del dado:

Inicio de la extrusión:

$$Er = \frac{(Dm - Dd)}{Dd} = \frac{(51.5 - 49.3)}{49.3} = \frac{2.2}{49.3} = 0.0446 = 4.46\%$$

Final de la extrusión:

$$Er = \frac{(Dm - Dd)}{Dd} = \frac{(51.25 - 49.3)}{49.3} = \frac{1.95}{49.3} = 0.0395 = 3.95\%$$

Con respecto a la muestra de perfil cuadrado observamos una distorsión en la geometría, debido a que presenta abombamiento lateral o el defecto denominado de "banana", cuando el perfil debiera de ser recto. El porcentaje de variación con respecto al perfil deseado es el siguiente:

Medida de lados.

$$Er = \frac{(Lm - Ld)}{Ld} = \frac{(50.3 - 50.0)}{50.0} = \frac{0.3}{50.0} = 0.006 = 0.6\%$$

Medida entre centros de lados.

$$Er = \frac{(Lm - Ld)}{Ld} = \frac{(51.7 - 50.0)}{50.0} = \frac{1.7}{50.0} = 0.034 = 3.4\%$$

B. RESULTADOS DE DUREZA ROCKWELL B.

Los resultados obtenidos de las pruebas de dureza de cada una de las muestras son las siguientes:

MUESTRA #1 PERFIL CIRCULAR (INICIO DE LA EXTRUSIÓN)

No. DE PRUEBA	1	2	3	4	Dureza Promedio
Distancia a partir del centro.					
0 mm.	54.50	54.50	54.50	54.50	54.500
5 mm.	56.50	55.50	55.50	55.00	55.625
10 mm.	56.00	56.00	55.00	55.00	55.500
15 mm.	55.00	55.50	55.50	55.50	55.375
20 mm.	55.50	55.00	55.00	55.70	55.300
23 mm.	53.00	53.00	52.50	52.50	52.750
		DUREZA	PROMEDIO	MUESTRA	54.841

En la fig. 22 se muestra la sección transversal de la barra de extrusión correspondiente al inicio de la misma, y se indican puntualmente las zonas en las que se realizaron las mediciones.

DUREZA ROCKWELL B
CARGA 100 kg
MUESTRA #1
INICIO DE EXTRUSION
MATERIAL: ZINALCO

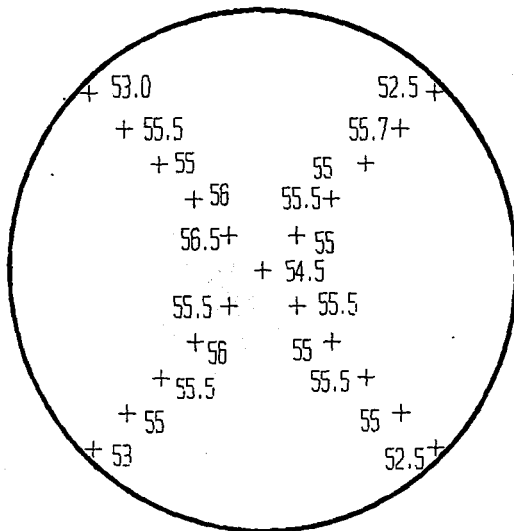


fig.27 Pruebas de dureza realizadas sobre la sección transversal de la barra de perfil circular de zinalco, del inicio de la extrusión

MUESTRA #2 PERFIL CIRCULAR (FINAL DE LA EXTRUSION)

No. DE PRUEBA	1	2	3	4	Dureza Promedio
Distancia desde el centro					
0 mm.	52.50	52.50	52.50	52.50	52.500
5 mm.	54.00	54.10	53.75	53.50	53.837
10 mm.	53.00	53.60	53.10	54.10	53.450
15 mm.	53.50	51.70	52.00	53.60	52.700
20 mm.	52.75	53.50	52.50	52.70	52.862
23 mm.	53.50	53.50	53.00	53.50	53.375
		DUREZA	PROMEDIO	MUESTRA:	53.120

En la figura 23 se presenta la sección transversal de la barra correspondiente al extremo final de la extrusión, donde se muestran puntualmente las zonas en las que se realizaron las mediciones.

MUESTRA DE PERFIL CUADRADO (INICIO DE LA EXTRUSION)

No. DE PRUEBA	1	2	3	4	Dureza Promedio
Distancia desde el centro					
0 mm.	55.50	55.50	55.50	55.50	55.500
5 mm.	58.00	56.00	56.00	56.50	56.625
10 mm.	58.50	56.50	57.50	57.50	57.500
15 mm.	58.00	57.60	58.00	57.50	57.775
20 mm.	57.50	58.00	57.50	57.00	57.500
25 mm.	57.50	57.00	57.50	56.50	57.125
30 mm.	55.00	54.60	56.00	55.50	55.275
35 mm.	53.50	52.50	53.50	53.00	53.125
		DUREZA	PROMEDIO	MUESTRA	56.303

En la fig.24 se presenta la sección transversal de la muestra de perfil cuadrado de la barra de extrusión, en la que se presentan puntualmente las zonas de medición.

DUREZA ROCKWELL B
CARGA 100 kg
MUESTRA #2
FINAL DE EXTRUSION
MATERIAL: ZINALCO

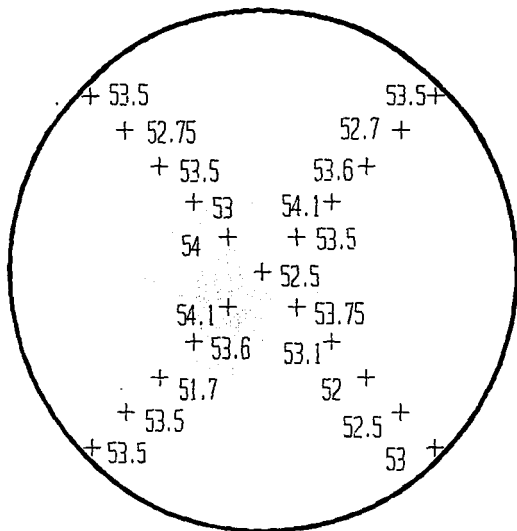


fig.28 Pruebas de dureza realizadas sobre la sección transversal de la barra de perfil circular de zincolco, del final de la extrusión.

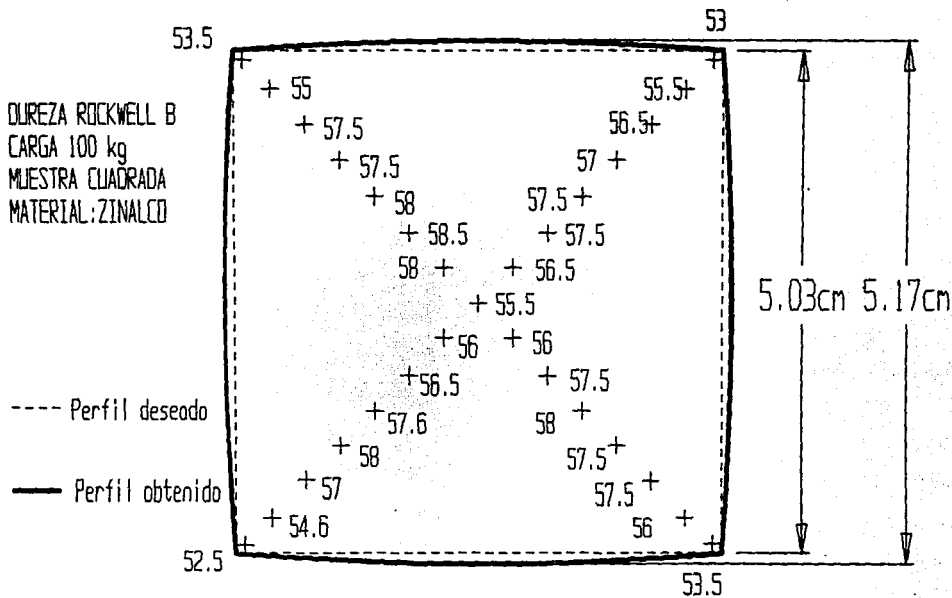


fig.29 Pruebas de dureza realizadas sobre la sección transversal de la barra de perfil cuadrado de extrusión.

Podemos ver estos resultados graficados en la siguiente figura, distancia a partir del centro de la muestra contra la dureza promedio.

-Para la muestra #1 de perfil circular, la dureza en el centro es menor que la de los siguientes 20mm, para disminuir nuevamente en la medición del anillo exterior. A partir de los 5mm del centro de la muestra comienza a existir un ligero decremento, para disminuir significativamente en los últimos milímetros. Esta última disminución puede ser afectada debido al desplazamiento del material típico de esta prueba, que se ve acelerado al tratarse de las orillas de la muestra.

-Para la muestra #2 del perfil circular, nuevamente observamos que la dureza en el centro es menor que las siguientes mediciones, notándose mayor uniformidad al alejarnos del centro de la muestra que en el caso anterior.

-Para la muestra cuadrada se observa un comportamiento similar a los anteriores, una dureza en el centro menor al promedio de la muestra, un aumento importante en los siguientes 5mm, seguido de un ligero decremento hasta disminuir significativamente en los últimos 5mm, que corresponden a la zona del perimetro de la muestra.

RESULTADOS DE DUREZA MUESTRA CIRCULAR #1

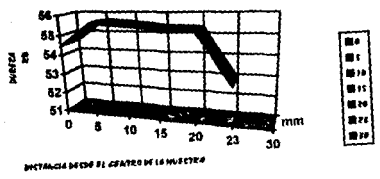


Fig.30 Gráfica de Resultados de dureza muestra Circular #1

RESULTADOS DE DUREZA MUESTRA CIRCULAR #2

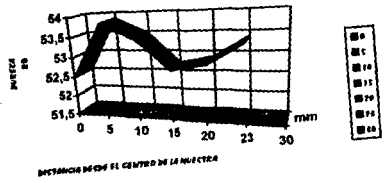


Fig.31 Gráfica de resultados de dureza muestra Circular #2

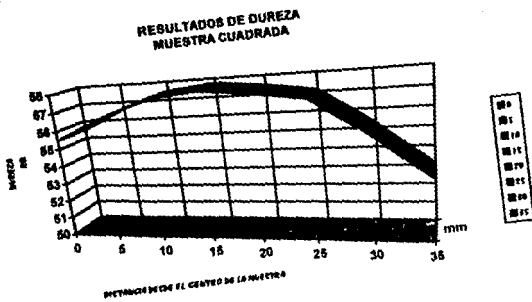


fig.33 Gráfico de resultados de dureza muestra Cuadrada

C. RESULTADOS DE MICRODUREZA VICKERS.

Los resultados obtenidos de las muestras de zincó extruídas se presentan a continuación, como ya mencionamos en el capítulo anterior, la carga empleada fue de 200 gr. y un tiempo de aplicación de 15 segundos. Se efectuó un mapeo a partir de la capa superficial en la sección transversal, hacia el interior de la muestra, con las distancias que se indican. En primer lugar, las microdurezas medidas de la muestra circular correspondiente al inicio de la extrusión.

Distancia desde la capa superficial de la muestra (mm)	Longitud de la diagonal #1 (μm)	Longitud de la diagonal #2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	NÚMERO DE DUREZA VICKERS
0.2	64.00	64.25	64.125	90.19
0.3	62.00	64.50	63.25	92.70
0.4	63.20	64.80	64.00	90.54
0.5	66.00	62.00	64.00	90.54
0.6	62.25	63.30	62.78	94.11
0.7	61.50	61.00	61.25	98.86
0.8	61.50	63.80	62.65	94.49
0.9	63.60	64.20	63.90	90.83
1.0	61.50	62.50	62.00	96.48
1.1	63.00	63.50	63.25	92.70
1.2	63.00	63.00	63.00	93.44
1.3	63.60	61.00	62.30	95.55
1.4	62.80	62.50	62.65	94.49
1.5	63.00	61.50	62.25	95.71
1.6	61.50	62.70	62.10	96.17
1.7	63.00	62.00	62.50	94.94
1.8	62.5	63.50	63.00	93.44
1.9	61.50	62.00	61.75	97.27
2.0	62.50	61.50	62.00	96.48
2.5	62.30	62.30	62.30	95.55
3.0	63.00	62.50	62.75	94.19

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para las microdurezas de la muestra circular correspondiente al final de la extrusión, indicándose las distancias a partir de la capa superficial de la sección transversal en donde se hizo la medición.

Distancia a partir de la capa superficial de la muestra(mm)	Longitud de la diagonal #1 (μm)	Longitud de la diagonal #2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	NÚMERO DE DUREZA VICKERS
0.2	62.75	62.50	62.63	94.57
0.3	62.75	62.60	62.68	94.41
0.4	62.40	62.10	62.25	95.70
0.5	63.00	62.50	62.75	94.19
0.6	62.10	61.50	61.80	97.11
0.7	60.50	61.50	61.00	99.67
0.8	63.00	61.00	62.00	96.48
0.9	60.80	61.60	61.20	96.48
1.0	62.60	61.50	62.05	96.33
1.1	61.20	60.60	60.90	99.99
1.2	61.50	61.25	61.38	98.44
1.3	62.50	61.50	62.00	96.48
1.4	61.10	61.50	61.30	98.69
1.5	62.00	62.50	62.25	95.71
1.6	61.50	62.00	61.75	97.26
1.7	61.75	61.40	61.58	97.82
1.8	62.00	61.50	61.75	97.26
1.9	61.20	61.50	61.35	98.54
2.0	61.50	60.90	61.20	99.02
2.5	63.00	63.00	63.00	93.44
3.0	62.50	63.00	62.75	94.19

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para las microdurezas de la muestra de extrusión de perfil cuadrado. Estas mediciones las realizamos a partir del centro de uno de los lados del cuadrado. Se indican las distancias a partir de la capa superficial de la sección transversal de la muestra en donde se hicieron las medidas.

Distancia a partir de la capa superficial de la muestra(mm)	Longitud de la diagonal #1 (μm)	Longitud de la diagonal #2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	NÚMERO DE DUREZA VICKERS
0.2	62.00	64.50	63.25	92.71
0.3	63.00	65.00	64.00	90.55
0.4	63.50	63.50	63.50	91.98
0.5	64.50	63.50	64.00	90.55
0.6	63.00	63.25	63.13	93.07
0.7	63.60	64.20	63.90	90.83
0.8	63.50	63.50	63.50	91.98
0.9	62.50	63.60	63.05	93.30
1.0	61.50	62.50	62.0	96.48
1.1	63.50	63.00	63.25	92.71
1.2	63.00	63.00	63.00	93.44
1.3	62.25	64.50	62.20	95.86
1.4	62.15	61.50	61.83	97.01
1.5	63.25	62.00	62.63	94.56
1.6	62.15	61.80	61.98	96.56
1.7	62.10	61.50	61.80	97.10
1.8	61.60	63.00	62.40	95.25
1.9	61.60	62.10	61.85	96.95
2.0	63.00	61.00	62.00	96.48
2.5	61.50	61.00	61.25	98.86
3.0	61.70	61.20	61.45	98.21

En la siguiente tabla se muestran las microdurezas medidas sobre la muestra de extrusión de perfil cuadrado, pero en este caso, el mapeo lo realizamos a partir de la capa superficial de una de las esquinas de la barra.

Distancia a partir de la capa superficial de la muestra(mm)	Longitud de la diagonal #1 (μm)	Longitud de la diagonal #2 (μm)	Diagonal Promedio (μm)	NÚMERO DE DUREZA VICKERS
0.2	60.00	62.50	61.25	98.86
0.8	60.60	61.00	60.80	100.32
1.4	60.00	61.00	60.50	101.32
2.0	60.00	61.00	60.50	101.32
2.6	60.00	60.00	60.00	103.02
3.2	61.50	60.80	61.15	99.18
3.8	60.00	62.50	61.25	98.86
4.4	61.00	60.80	60.90	99.99
5.0	61.00	61.60	61.30	98.70
5.6	60.75	61.40	61.08	99.42
6.2	60.00	61.40	60.70	100.66
6.8	60.50	62.50	61.50	98.06

A continuación, presentamos los resultados de los mapeos anteriores, pero graficados, para ver la variación de la dureza en función de la longitud a partir de la orilla de la muestra.

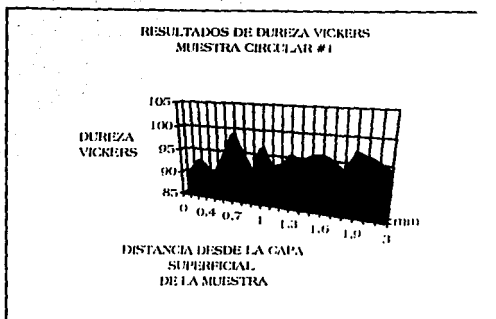


fig. 33 Gráfica de resultados de microdurezas de la muestra Circular correspondiente al inicio de la extrusión.

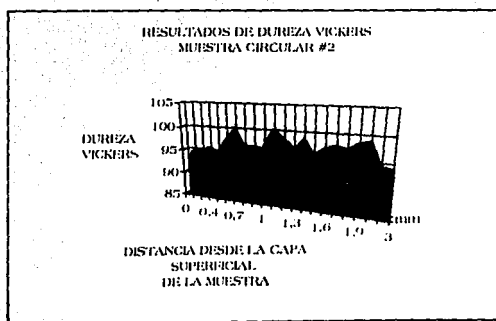


fig. 34 Gráfica de resultados de microdurezas de la muestra Circular correspondiente al final de la extrusión.

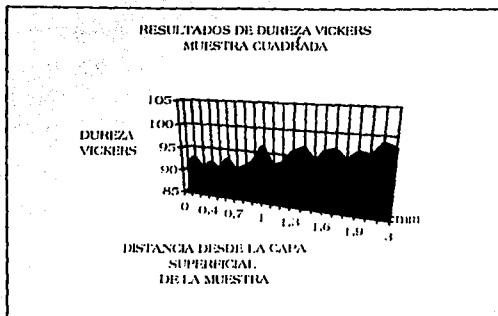


fig. 35 Gráfica de resultados de microdurezas de la muestra de perfil cuadrado a partir de uno de los lados.

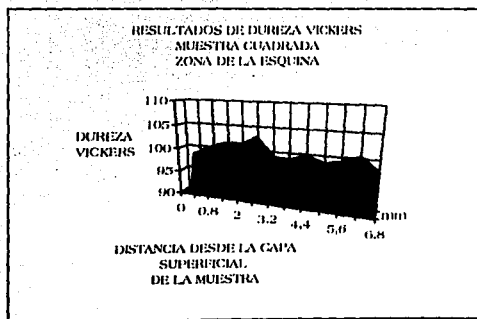
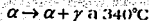


fig. 36 Gráfica de resultados de microdurezas de la muestra de perfil cuadrado a partir de una de las esquinas.

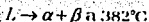
**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

D.RESULTADOS DE METALOGRAFIAS.

En la siguiente figura mostramos el diagrama de fase del sistema binario Al-Zn, que presenta solubilidad parcial en el estado sólido y total en estado líquido. En el estado sólido se observan las fases α , α' , β , γ , y se verifican las transformaciones eutéctoides:



Durante la solidificación se llevan a cabo los cambios peritéctico y eutéctico



respectivamente.

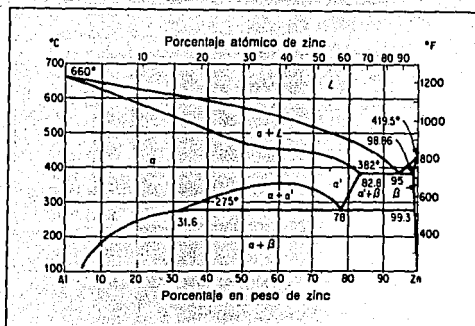


fig.37 Diagrama de fases del sistema Al-Zn.

La fase α es una solución sólida sustitucional del zinc en aluminio (rica en aluminio), mientras que la fase β es una solución sólida sustitucional de aluminio en zinc (rica en zinc). Los constituyentes de las fases α y β de la superficie de una muestra de zinco pulida a espejo, a temperatura ambiente, tendrán distinto tono cuando se

observan en el microscopio electrónico de barrido: el componente de fase α tendrá un tono oscuro, mientras que el de la fase β , un tono claro. Las regiones en la superficie con composiciones intermedias a los de estas fases presentarán matices en la escala del gris.

A continuación presentamos las fotografías de las microestructuras del zinclo extruido.

1. MUESTRA DE PERFIL CUADRADO.

En la siguiente figura presentamos el formato del primer mapeo realizado en la muestra de zinclo extruido con perfil cuadrado.

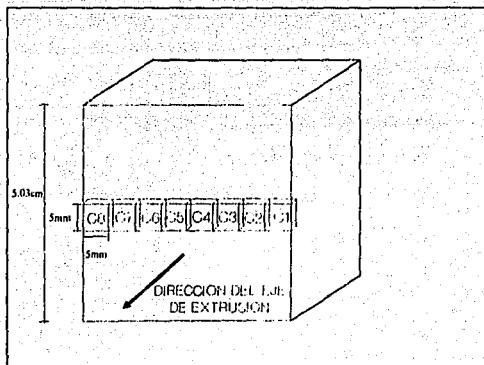


fig.38 Primer mapeo para la muestra de perfil cuadrada.

Trabajamos con ocho muestras a lo largo de la sección transversal de la barra de extrusión, en las explicaciones nos referiremos a cada una de acuerdo a la fig. 38. Presentamos las microestructuras más importantes para el desarrollo de este trabajo.

Las microestructuras observadas en la fig.39 corresponden a la secuencia de las muestras C8, C7, C6 y C5 respectivamente. Las cuatro fotografías fueron tomadas con una amplificación de 1500X, y fueron tomadas en la zona central de cada una de las muestras; con objeto de visualizar si existen cambios en la microestructura a lo largo del centro de la sección transversal de la barra de extrusión.

En la primera de las microestructuras, observamos que existe una distribución uniforme de islas de perlitita fina y dominios de fase rica en zinc. En las tres últimas fotos se presenta una estructura muy similar, ya que no se observan cambios en la orientación de los granos ni en el tamaño de los mismos; con colonias de perlitita fina, granos de fase α (rica en aluminio) y granos de fase β (rica en zinc). No observamos la presencia de precipitados negros, que se caracterizan por tener formas geométricas regulares.

DIRECCION DE EXTRUSIÓN: ⊗ (perpendicular a la sección transversal)

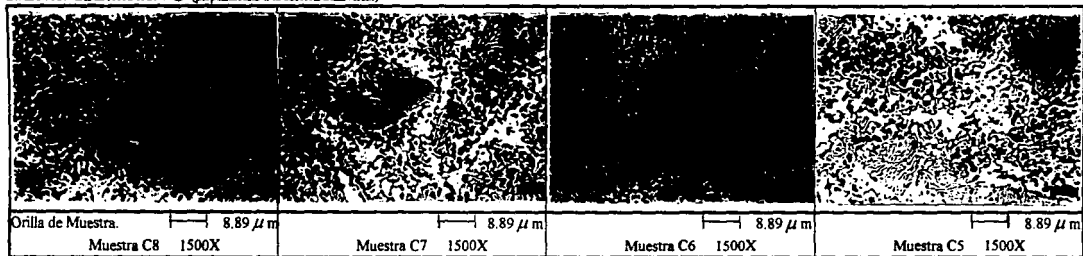


fig.39 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra de extrusión de zinc de perfil cuadrado, primer mapeo, muestras C8,C7,C6 y C5.No se observan cambios importantes entre las microestructuras.

A continuación presentamos el formato del segundo mapeo realizado en la muestra de perfil cuadrado.

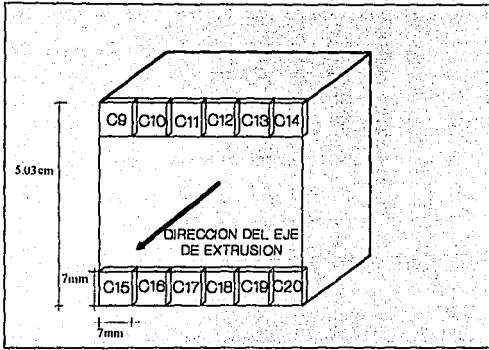


Fig.40 Segundo Mapeo para la muestra de perfil cuadrado.

Trabajamos con 12 muestras a lo largo de los bordes de la barra; todas las fotografías están tomadas sobre la sección transversal de la barra.

En la fig.41, mostramos las fotos correspondientes a la secuencia de las muestras C9, C10 y C11. La microestructura de la muestra C9 (1500X), en la zona de la esquina, presenta una textura de bandas en forma oblicua. La orientación se aprecia mayormente en los granos de fase B que en los de fase α ; así también se observan pequeñas islas con estructura de perlita fina; la orientación es debida a la fricción del tocho con las paredes del dado, que provocan que el material fluya de ese modo en esta zona. En la segunda fotografía (1500X), que corresponde a la muestra C10 en la zona próxima a la capa superficial, la estructura presenta una textura de bandas con orientación horizontal

debido a la fricción del tocho con las paredes del dado, la orientación es observable tanto en los granos de fase α como de fase β apreciándose muy pocos dominios de perflia fina. En la tercera foto, (1000X) que corresponde a la muestra C11, en la zona próxima a la capa superficial, se sigue observando el mismo patrón de orientación en bandas en la capa superficial del producto extruido.

La siguiente secuencia de fotos, fig.42, corresponde a las muestras C14, C13 y C12 respectivamente. La primera de ellas (750X), tomada en la región de la esquina de la barra de extrusión, presenta una ligera orientación oblicua debido a la fricción con las paredes del dado; además se aprecian pequeñas islas de perflia fina. La segunda de las fotografías (1500X) fue tomada en la zona central de la muestra, del lado próximo a la capa superficial. La estructura presenta textura de bandas con orientación horizontal. La tercera de las fotos (1500X), correspondiente a la muestra C12, en la región de la capa superficial de la sección transversal, presenta la textura de bandas horizontales en la capa superficial de la barra. Se observan granos de fase α atrapados en bandas de fase β .

La siguiente secuencia de fotos, fig.43, corresponde a la muestra C13, en la que realizamos un mapeo de la muestra a partir de la capa superficial de esta. La primera de las fotos (1000X), se tomó en la capa superficial, y se aprecia la textura de bandas con orientación horizontal y no se observan dominios predominantes de alguna de las fases. La segunda y tercera fotos (750X), fueron tomadas a 0.1 mm y a 1.0 mm respectivamente de la capa superficial de la barra. En ambas se sigue apreciando la textura de bandas, con la diferencia de que en la tercera foto se aprecia ya cierto desorden en las bandas, es decir, la textura no es tan uniforme como en las dos primeras fotos. Los dominios de cada una de las fases ya son de mayor tamaño y más redondeados. En la cuarta

DIRECCION DE EXTRUSION: ⊗ (perpendicular a la sección transversal)

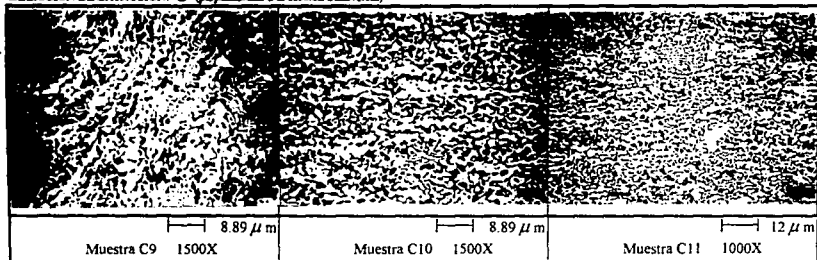


fig.41 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra de extrusión de zinc de perfil cuadrado, segundo mapeo, muestras C9,C10 y C11. Fotografías tomadas en la capa superficial, mostrando textura de bandas

DIRECCION DE EXTRUSION: ⊗ (perpendicular a la sección transversal)

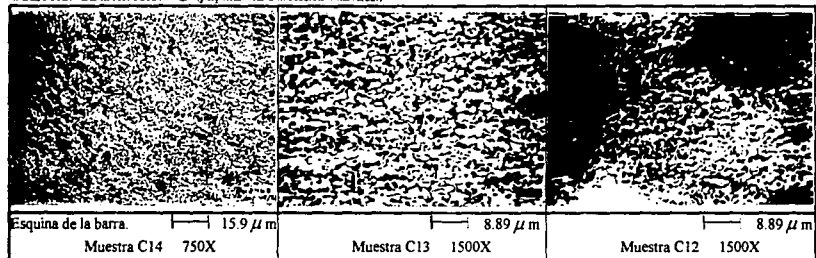


fig.42 Microestructuras correspondientes a la barra de extrusión de zinc de perfil cuadrado, segundo mapeo, muestras C14, C13 y C12, de la zona próxima a la capa superficial. Se observa textura de bandas.

foto(750X), que se tomó a 2.4 mm de la capa superficial se observa apenas una ligera textura de bandas y los dominios de las fases α y β se aprecian de un mayor tamaño y con una orientación no muy bien definida.

En la fig.44, presentamos las fotografías correspondientes a la secuencia de la cuarta esquina de la barra, muestra C15. La primera foto (1500X) se tomó en la zona de la capa superficial, y se observa la textura en bandas oblicuas, con pequeños dominios de perlitina fina, granos de fase α y dominios de fase β , con orientación definida. La siguiente estructura (1500X) corresponde a la misma zona, pero a 0.5mm de la capa superficial de la barra, se observa una disminución casi total de la orientación a 45° respecto de la foto anterior. Se aprecian los dominios de perlitina fina. La siguiente fotografía (1500X), corresponde a la misma zona, pero a 1mm de la frontera exterior de la barra. Ya no se aprecia orientación definida, los dominios de perlitina fina están distribuidos uniformemente, así también los granos de fase α y fase β están sin una orientación definida.

En la fig.45, observamos fotografías correspondientes a la muestra C17. La primera foto (1500X) se tomó en la zona de la capa superficial de la barra. Se observa claramente una textura de bandas con una orientación perfectamente definida. No existen dominios predominantes. La segunda foto (1500X), corresponde a la misma zona, pero a 0.4 mm de la capa superficial. Se observa un ligero aumento en el ancho de las bandas, así como en el tamaño de los dominios de perlitina fina. Se observan precipitados negros y granos de fases α y β con orientación definida. La tercera de las fotos (1500X) se tomó en la misma zona, pero a 0.8 mm de la capa superficial. Se hace patente al aumento en el ancho de las bandas, y en algunas zonas se aprecia un poco de desorden en el arreglo de las bandas.

DIRECCION DE EXTRUSIÓN: ⊗ (perpendicular a la sección transversal)

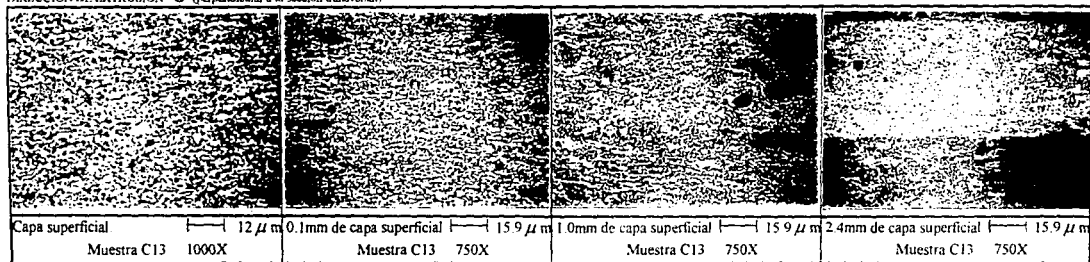


fig.43 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra de extrusión de zinc de perfil cuadrado, segundo mapeo, muestra C13. La primera foto corresponde a la zona más próxima a la capa superficial, la cuarta fue tomada a 2.4 mm de la capa superficial. Se observa una disminución paulatina en la textura de bandas.

DIRECCION DE EXTRUSIÓN: ⊗ (perpendicular a la sección transversal)

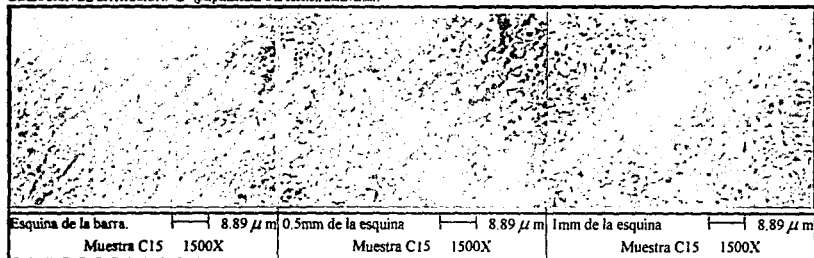


fig.44 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra de extrusión de zinc de perfil cuadrado, segundo mapeo, muestra C15. La primera corresponde a la esquina de la barra, la cuarta se tomó a 1.0mm de la esquina. Se observa una disminución progresiva de la textura.

DIRECCION DE EXTRUSION ⊗ (perpendicular a la sección transversal)

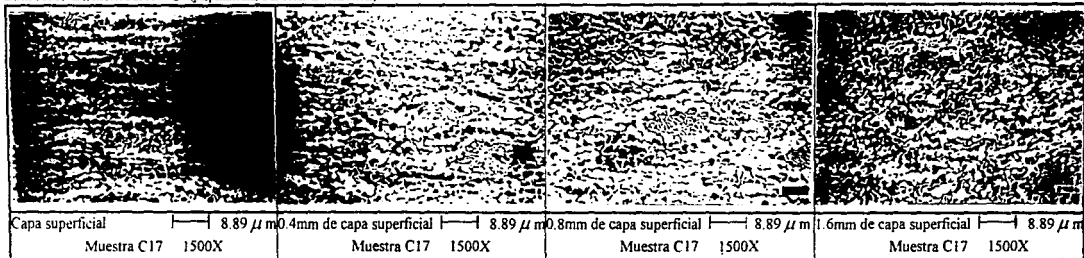


fig.-45 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra de extrusión de zincado de perfil cuadrado,segundo mapeo,muestra C17. La primera corresponde a la zona de la capa superficial de la barra.La cuarta se tomó en la misma zona pero a 1.6mm de la capa superficial. Se observa la disminución en la textura de bandas conforme nos alejamos de la capa superficial.

En la cuarta de las fotos (1500X), tomada a 1.6 mm de la capa superficial de la barra casi ha desaparecido la textura de bandas con orientación horizontal. Se observa un aumento en el tamaño de las islas de perfito fina y zonas que ya no tienen orientación alguna.

A continuación presentamos el formato del tercer mapeo realizado en la muestra de perfil cuadrado.

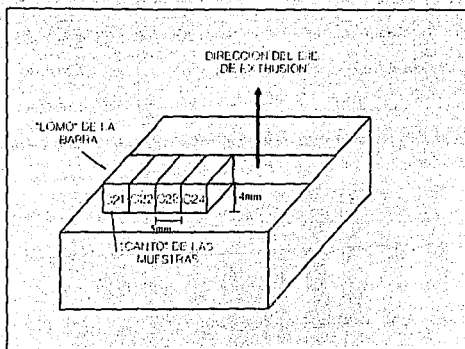


fig.46 Tercer mapeo para la muestra de perfil cuadrado.

Trabajamos con cuatro muestras; tomamos fotografías del "lomo" de la barra y del "canto" de las muestras, que corresponden a la sección longitudinal de la barra de extrusión.

La fig.47, presenta fotografías tomadas en la zona de el "lomo de la barra", de la muestra C21. En la primera de ellas (1500X) observamos una textura de bandas con orientación en la dirección del eje de la extrusión, la orientación es más notoria en los

granos de fase β . Se observan granos pequeños de fase α ; así también, un gran dominio de perlitina fina. La siguiente foto (1000X), correspondiente a otra zona del "lomo" de la barra, es similar a la anterior, con un ligero aumento en la textura de bandas. La tercera foto (1500X), corresponde a otra zona del "lomo" de la barra; la estructura es similar, con un aumento en el tamaño de los dominios de perlitina fina. La cuarta foto, corresponde a la misma isla de perlitina fina de la fotografía anterior, pero con un aumento de 3500X.

La fig.48, presenta estructuras del canto de la muestra C21. La primera foto (1500X), corresponde a la zona de la capa superficial; observamos una textura de bandas con orientación en la dirección del eje de extrusión, los granos de las fases α y β están uniformemente alineados; así también los pequeños dominios de perlitina fina. La segunda foto (1500X) corresponde a la misma zona, pero a 1.0mm de la capa superficial. Se observa un precipitado negro con forma geométrica romboidal. La tercera foto (1500X) corresponde a la misma zona, pero a 1.5mm de la capa superficial de la barra, y la cuarta fue tomada a 2.5mm de la capa superficial. Observamos que es una estructura muy similar, con la orientación en dirección del eje de extrusión. Se aprecia un ligero aumento en el ancho de las bandas. Las dos últimas fotos son muy similares a la anterior pero con un aumento en el tamaño de los dominios de perlitina fina.

La fig.49, presenta estructuras del canto de las muestras. La primera estructura (1000X) corresponde al canto de la muestra C22, y se observa una textura de bandas con orientación en la dirección del eje de extrusión; existe un aumento en el tamaño de los dominios de perlitina fina y en los granos de fase α . La segunda estructura (1000X), corresponde al canto de la muestra C23, y se observa una textura de bandas similar a las anteriores, con los granos de fase α y de fase β alineados, así también, los

dominos de perlitia fina. La tercera estructura (1000X), corresponde al canto de la muestra C24, en la que se observa una orientación similar a las anteriores, pero con un aumento en el ancho de las bandas de fase B. La cuarta estructura (1000X), corresponde a otra zona de la muestra anterior.

DIRI CCION DE EXTRUSION ↑ (paralela a la seccion)

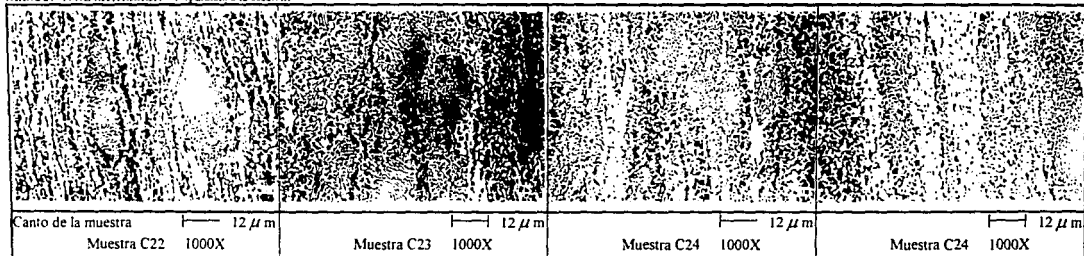


fig 49 Microestructuras correspondientes a la barra de extrusión de zinc/co de perfil cuadrado,tercer mapeo,muestras C22,C23 y C24.
Las fotografías corresponden al canto de la barra.Se observa la textura de bandas con orientación en la dirección del eje de extrusión.

2. MUESTRA DE PERFIL CIRCULAR DEL INICIO DE LA EXTRUSIÓN.

Presentamos en la siguiente figura el formato del primer mapeo realizado en esta muestra.

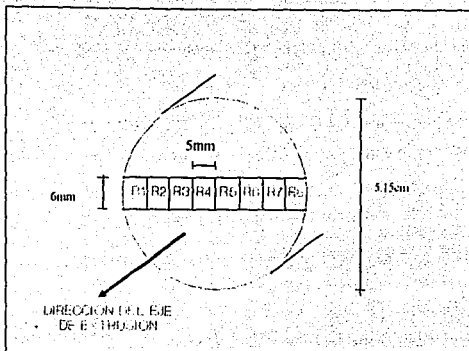


fig.50 - Primer mapeo para la muestra de perfil circular del inicio de la extrusión

Trabajamos con 8 muestras a lo largo de la sección transversal de la barra de la extrusión.

La fig.51, presenta estructuras de la sección transversal de la barra. Las cuatro fotografías fueron tomadas a una amplificación de 1500X, y todas corresponden a la zona central de las muestras. La primera estructura corresponde a la muestra R1. La estructura observada es de islas de perlitita fina atrapadas en la matriz de zinc. No observamos orientación alguna de los granos de las fases α y β . Tampoco observamos precipitados negros con formas geométricas. Las demás microestructuras presentan una estructura muy similar a la primera. La segunda, tercera y cuarta fotos corresponden a las muestras R2, R3 y R4, respectivamente. Observamos dominios de perlitita fina, granos de

fases α y β sin orientación alguna. Se observan islas de perlita fina dispersos uniformemente en una matriz de fase β (color blanco).

La fig.52, presenta la siguiente secuencia de fotografías correspondiente a la muestra R1. Todas las fotografías se tomaron a una amplificación de 1500X. Realizamos un mapeo a partir de la capa superficial de la muestra a lo largo de la sección transversal. La primera estructura, corresponde a la zona más próxima a la capa superficial. Se observan islas de perlita fina, granos de fases α y β . Se aprecia una textura de bandas en la orientación de los granos de las fases α y β . La segunda estructura corresponde a la misma zona, pero a 0.5 mm de la capa superficial. La tercera estructura, corresponde a la misma zona, pero a 1mm de la orilla, mientras que la cuarta, corresponde la misma zona, pero a 1.5mm de la capa superficial. La segunda y tercera microestructuras son muy similares, en las que observamos una disminución en la orientación de bandas con respecto a la foto de la zona de la capa superficial; y un ligero aumento en el tamaño de los dominios de perlita fina. En la cuarta microestructura, disminuye aún más la orientación de bandas y ya se aprecia cierto desorden en la distribución de los granos de las dos fases. No se observan precipitados negros.

La fig.53, se presenta la continuación de la secuencia anterior; del mapeo de la zona de la capa superficial de la barra, en la muestra R1. La primera foto (1500X), corresponde a la zona de la frontera exterior de la barra, pero a 2mm de la orilla. Ya no se observa ninguna textura de bandas, se aprecian granos de fases α y β y pequeños dominios de perlita fina en una gran matriz de zinc. La segunda foto (1000X), corresponde a la misma zona, pero a 2.5mm de la orilla. La tercera foto (1500X), corresponde a la misma zona, pero a 3mm de la orilla. Las microestructuras son muy similares a la primera fotografía. En la última, observamos un precipitado negro, con forma geométrica romboidal.

DIRECCION DE EXTRUSION ⊙ (perpendicular a la seccion transversal)

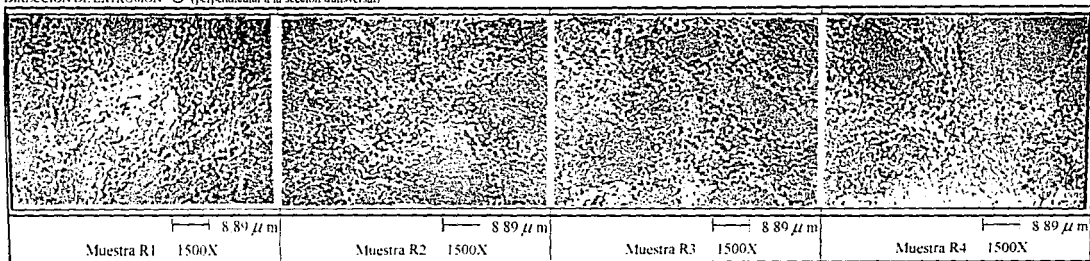


fig 51 Microestructuras correspondientes a la barra de extrusion de zinaco de perfil circular del inicio, primer mapeo, muestras R1, R2, R3 y R4. Las fotos fueron tomadas en el centro de cada muestra. No hay variación significativa en las microestructuras

DIRECCION DE EXTRUSION ⊙ (perpendicular a la seccion transversal)

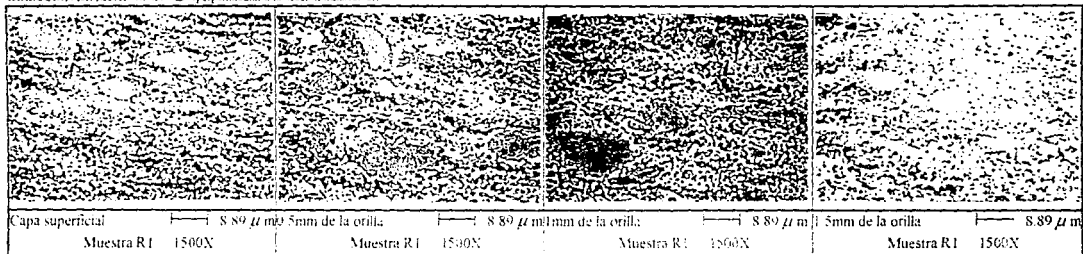


fig 52 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra de extrusion de zinaco de perfil circular del inicio, primer mapeo, muestra R1. Se observa la disminucion paulatina de la textura de bandas conforme nos alejamos de la capa superficial

DIRECCION DE EXTRUSION: ⊗ (perpendicular a la sección transversal)

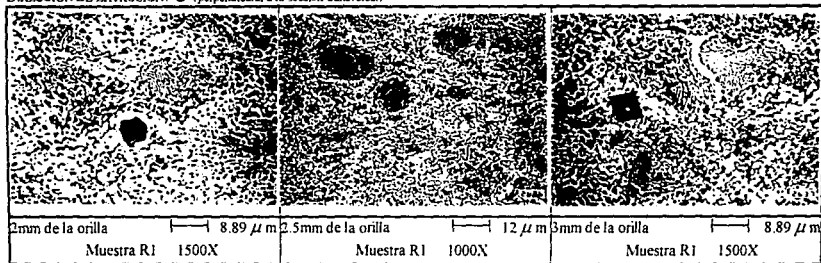


fig.53 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra del inicio de la extrusión de zinc de perfil circular, primer mapeo, muestra R1. Continuamos con la secuencia de la figura anterior.

DIRECCION DE EXTRUSION: ↑ (paralela a la sección)

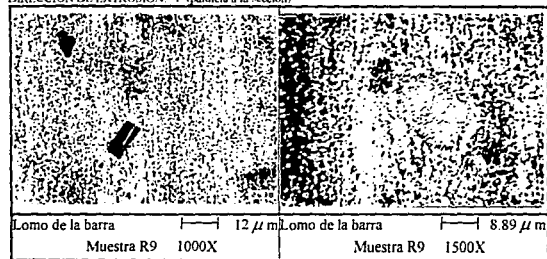


fig.54 Microestructuras correspondientes a la barra del inicio de la extrusión de zinc de perfil circular, segundo mapeo, muestra R9. Observamos la textura de bandas con dirección del eje de la extrusión.

En la siguiente figura presentamos el formato del segundo mapeo realizado para esta muestra circular.

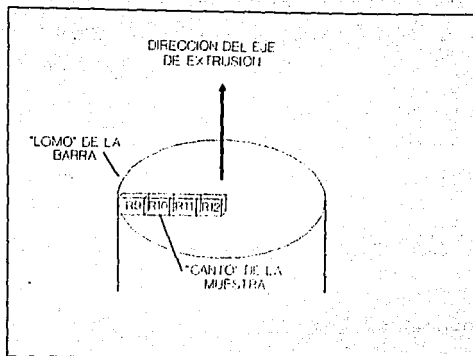


fig.55 Segundo mapeo para la muestra de perfil circular del inicio de la extrusión.

Las fotografías fueron tomadas del "lomo" de la barra y del "canto" de las muestras, esto es, de la sección longitudinal de la extrusión.

La fig.54 . La primera estructura (1000X), corresponde a la muestra R9, girada para poder observar el lomo de la barra. Observamos textura de bandas con orientación en la dirección del eje de la extrusión; además se observan dos precipitados negros, uno con geometría rectangular y otro romboidal. No se observan islas de perlita fina. La segunda estructura (1500X), corresponde a otra zona del lomo.

La fig.56, presenta las fotografías tomadas en la zona del canto de las muestras. La primera estructura (1500X), corresponde al canto de la muestra R9, en la zona más próxima a la capa superficial; en la que se observa textura de bandas, con islas atrapadas de perlita fina. Además se observa una microfisura (que sin duda se debe a una pequeña burbuja de aire que quedó atrapada durante la extrusión). La segunda estructura (1500X), corresponde a la misma zona, pero a 0.25 mm de la capa superficial. La tercera estructura (1500X) corresponde a la misma región, pero a 0.5 mm de la capa superficial de la barra. Se observa una gran isla de perlita fina y textura de bandas con orientación en dirección al eje de extrusión. Es una estructura muy similar a las anteriores.

La fig.57, presenta otra secuencia de fotografías del canto de la barra. La primera estructura (1500X), corresponde al centro de la muestra R9. Se observan bandas anchas de perlita fina, y de granos de fases α y β . La segunda estructura (1000X), corresponde al canto de la muestra R10, en la que observamos textura de bandas con orientación en dirección al eje de extrusión, pero con un aumento en el ancho de las bandas de fase β . Se observan islas de perlita fina atrapadas, y granos de fase α alineados. La tercera estructura (1000X), corresponde al canto de la muestra R11; se observa una estructura muy similar a la anterior. La cuarta estructura mostrada (1000X), corresponde al canto de la muestra R12, en la que observamos pequeñas islas de perlita fina atrapadas entre dominios de fase β y de fase α .

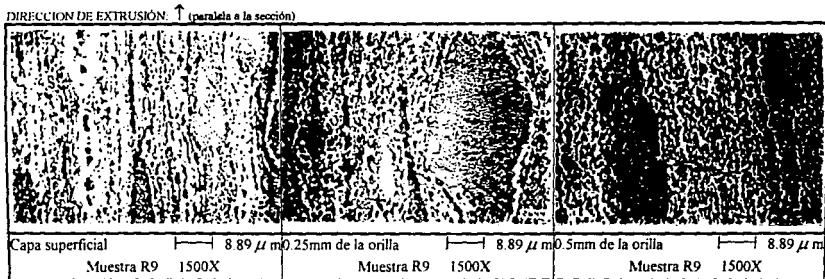


fig 56 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra del inicio de la extrusión de zincalco de perfil circular,segundo mapeo,muestra R9. Corresponden al mapeo realizado en la zona del canto de la barra Se observa la textura de bandas con orientación del eje de extrusión.

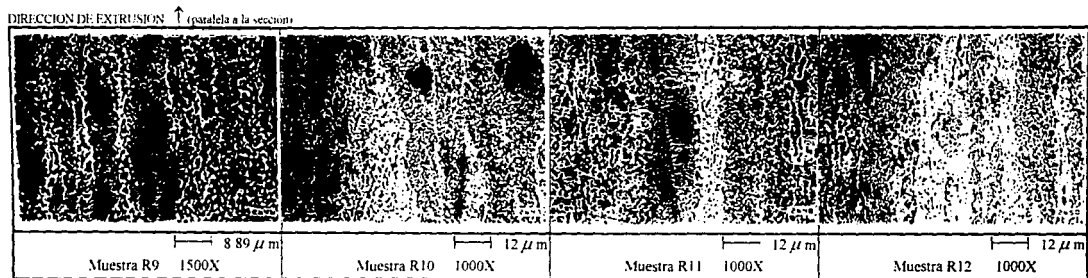


fig 57 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra del inicio de la extrusión de zincalco de perfil circular,segundo mapeo,muestras R9,R10,R11,R12. Las fotos corresponden al canto de la barra Se observa la textura de bandas,con dirección al eje de extrusión.

3.MUESTRA DE PERFIL CIRCULAR DEL FINAL DE LA EXTRUSION.

En la siguiente figura presentamos el formato del primer mapeo realizado en la muestra:

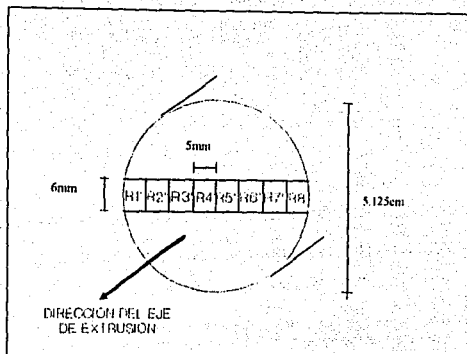


fig.58 Primer mapeo para la muestra de perfil circular del final de la extrusión

Trabajamos con 8 muestras a lo largo de la sección transversal de la barra.

La fig.59, presenta fotografías de la secuencia de las microestructuras de las muestras R1', R2', R3' y R4' respectivamente. Todas las fotografías fueron tomadas a una amplificación de 1500X y corresponden a su zona central. La primera estructura no presenta orientación definida, esto se debe a que al final de la extrusión existe un incremento de temperatura en el proceso con respecto al inicio debido a la fricción del tocho de material con la pared del dado, provocando que la fuerza de cohesión que une los granos del material decaiga rápidamente, esto se traduce en una fuerte disminución del esfuerzo de tensión y al mismo tiempo en un aumento en la ductilidad. Se observa

una disminución en el tamaño de grano de las fases α y β , y un incremento de los dominios de perlita fina, principal componente de esta microestructura. La segunda estructura presenta una estructura muy similar a la anterior. La tercera estructura es muy similar a las anteriores, con abundantes dominios de perlita fina y una disminución en el tamaño de grano con respecto al inicio de la extrusión. La cuarta estructura es similar, con un aumento en el tamaño de los dominios de perlita fina, y un incremento notable de los granos de fase α .

La fig.60, presenta la secuencia de las microestructuras observadas en la muestra R1', de un mapeo realizado a partir de la capa superficial. Todas las fotografías fueron tomadas a una amplificación de 1500X. La primera microestructura corresponde a la capa superficial de la barra, y presenta una estructura donde abundan los dominios de perlita fina, y se observa un aumento considerable en los granos de fase α , todos los granos son muy finos, y no se observa orientación alguna en la distribución de las fases. La segunda estructura, corresponde a la misma zona, pero a 0.5mm de la capa superficial. La tercera estructura corresponde a la misma zona, pero a 1mm de la capa superficial, y la cuarta corresponde a la misma zona, pero a 1.5mm de la capa superficial. Todas las estructuras son muy similares entre sí, con granos muy finos de las fases alfa y beta, no se observan precipitados negros ni grandes dominios como los observados en las microestructuras de la muestra del inicio de la extrusión.

La fig.62, presenta las estructuras correspondientes al mapeo anterior. Las fotografías fueron tomadas a una amplificación de 1500X. La primera estructura corresponde a la zona de la capa superficial, pero a 2mm de la orilla. Nuevamente, no se aprecia en esta zona ningún tipo de textura de banda ni orientación alguna. Se observan granos finos de fases α y β , y muy pequeños dominios de perlita fina. También se

DIRECCION DE EXTRUSION: ⊗ (perpendicular a la seccion transversal)

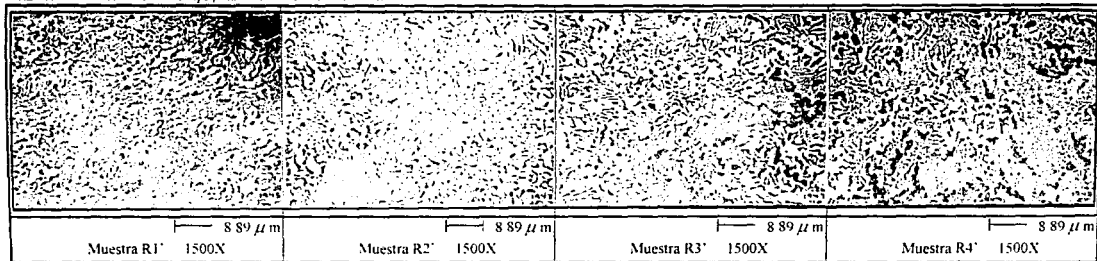


fig 59 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra del final de la extrusión de zincalco de perfil circular, primer mapeo, muestras R1', R2', R3' y R4'.
Todas las fotos se tomaron en la zona central de las muestras. Todas las estructuras son similares.

DIRECCION DE EXTRUSION: ⊗ (perpendicular a la seccion transversal)

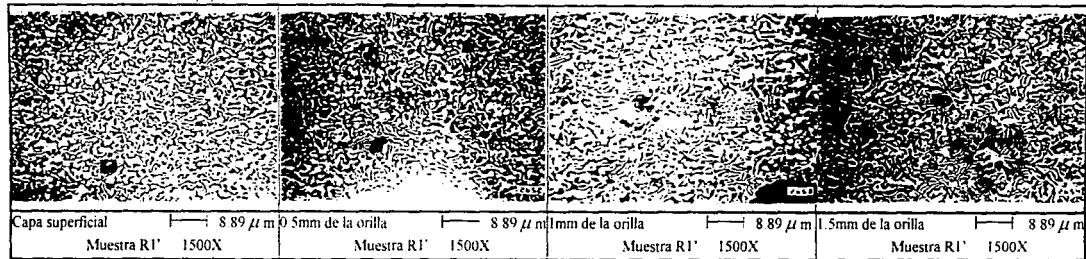


fig 60 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra del final de la extrusión de zincalco de perfil circular, primer mapeo, muestra R1'.
La primera foto es de la capa superficial, la cuarta se tomó a 1.5mm de la orilla. Los granos son más finos que en la muestra del inicio de la extrusión.

observan pequeños precipitados negros. La segunda estructura, corresponde a la misma región, pero a 2.5 mm de la capa superficial. Es una estructura muy similar a la anterior. La tercera estructura, es una estructura muy similar a las anteriores, y fue tomada a 3mm de la capa superficial. Se observa un aumento en el número de precipitados negros, y de granos de fase α .

En la siguiente figura se representa al formato del segundo mapeo realizado en la muestra.

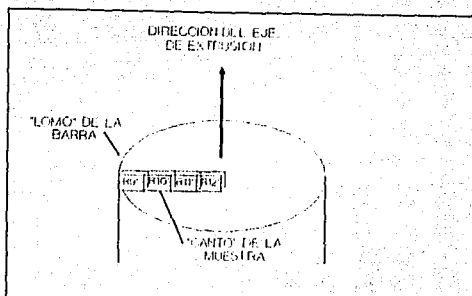


fig.61 Segundo mapeo para la muestra circular del final de la extrusión.

Trabajamos con cuatro muestras, fotografiando el "lomo" de la barra y el "canal" de cada una de las muestras, es decir, a través de la sección longitudinal de la extrusión.

La fotografía correspondiente al lomo de esta barra, aparece en la fig. 63. Se observa una textura de bandas, paralela al eje de la extrusión. Los granos de las fases alfa y beta son muy finos.

La fig.64, presenta las estructuras fotografiadas de la zona del canal de la barra de extrusión. La primera estructura (1500X), corresponde a la muestra R9', en la zona de la capa superficial; observamos textura de bandas con orientación en dirección al eje de

extrusión, compuesta en su mayoría por dominios de perlita fina, con granos de fases α y β . La segunda estructura (2000X), corresponde a la muestra R10'. Observamos una estructura muy similar a la anterior con textura de bandas y dominios de perlita fina. La tercera estructura (1000X), corresponde a la muestra R11'. Es una estructura muy similar a las anteriores. La cuarta estructura (1500X), corresponde a la muestra R12'. Se observa un aumento en el ancho de las bandas de perlita fina y de fase β .

DIRECCION DE EXTRUSION ⊗ (perpendicular a la seccion transversal)

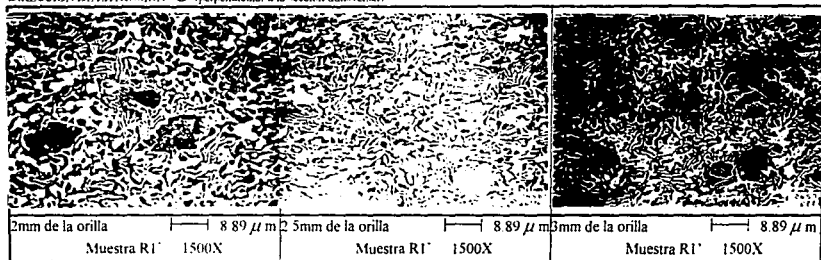


fig 62 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra del final de la extrusión de zinc de perfil circular, primer mapeo, muestra R1'. Se observa la continuación del mapeo de la figura anterior.

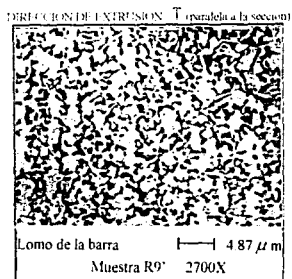


fig 63 Microestructura correspondiente a la barra del final de la extrusión de zinc de perfil circular, segundo mapeo, muestra R9'. Se observa la textura de bandas con orientación paralela al eje de la extrusión.

DIRECCION DE EXTRUSION ↑ (paralela a la seccion)

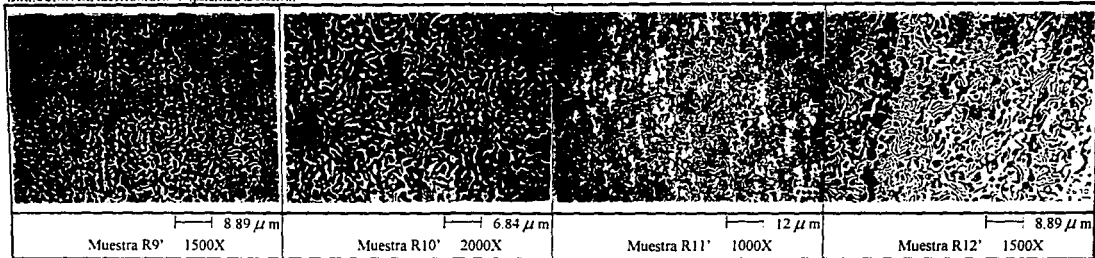


fig 64 Secuencia de microestructuras correspondientes a la barra del final de la extrusión de zinc de perfil circular,segundo mapeo,muestras R9',R10',R11' y R12'. Las microestructuras corresponden al canto de la barra.Se observa la textura de bandas con dirección del eje de extrusión.

E.DISCUSION.

En la mayoría de los casos, durante el desarrollo de una investigación, se llegan a resultados esperados y en otros casos los resultados son completamente inesperados; pero lo más importante es determinar la causa de esos resultados y encontrar una razón lógica de éstos. Así es como se han descubierto la mayoría de los inventos y efectos de la materia en nuestra civilización.

De los resultados de medidas de la distorsión.

Es en la muestra de perfil cuadrado, en la que se aprecia a simple vista una distorsión en el perfil, ya que el perfil deseado es el de un cuadrado perfecto, y como vemos en la fig.24 la barra presenta un abombamiento en cada uno de sus lados. Sin embargo, en la dimensión de esquina a esquina no hay una variación significativa con respecto a la dimensión deseada.

Como vimos en el capítulo 1, en el apartado E.7., esta distorsión se debe a que durante el proceso de extrusión se presentó el defecto llamado de "banana" o de combadura. Hay que recordar que la extrusión de las barras de zincalco con las que trabajamos fueron hechas con las herramientas de extrusión convencionales para la extrusión del aluminio. Por otro lado, se ha establecido que la distorsión de los perfiles en la extrusión se originan en el dado (1) (2), y la experiencia ha demostrado que un dado para extruir aluminio, cobre o latón no es totalmente adecuado para extruir zincalco (2).

En el caso de las muestras de la barra de perfil circular se determinó una ligera variación entre los diámetros de éstas; ya que la del inicio de la extrusión tiene 0.25mm por arriba de la del final de la extrusión. Esto es debido a que al inicio de la extrusión existe una mayor fricción entre el lingote y las paredes de la recámara, así como la del perfil contra el dado, siendo las principales causas de la elevación de la presión de

extrusión, ya hacia el final de la extrusión el material fluye más uniformemente y a una mayor temperatura.

Para obtener el perfil deseado, es importante el diseño de la entrada del dado, ya que los defectos observados tienen su origen en efectos de fricción por el patrón de flujo que no pueden ser evitados fácilmente, por lo que el fabricante de herramientas debe hacer ligeros cambios como son el cambiar la geometría de los dados para lograr un efecto contrario al defecto observado para contrarrestar la curvatura en el perfil y lograr el ajuste final para obtener la rectitud en el producto.

Otras causas que producen combaduras en el producto son: una distribución no uniforme de la temperatura en la extrusión en caliente e irregularidades en el material (1).

De los resultados de la prueba de dureza.

Idealmente pensaríamos que el producto extruido debería presentar la misma dureza a través de su sección transversal, pero en base a los resultados obtenidos vemos que esto está lejano a lo que pasa en la realidad.

De los resultados de dureza Rockwell.

En el caso de la muestra de perfil cuadrado correspondiente al inicio de la extrusión, determinamos una dureza promedio de 56.303 RBH. Iniciando a partir del centro de la muestra con una dureza de 55.50 para aumentar en los siguientes 5mm a 56.60 y continuar en los siguientes 20mm a un promedio de 57.50 y disminuir en el perímetro de la muestra a 53.125. Probablemente las mediciones en la zona perimetral se vieron afectadas por la cercanía del indentador del durómetro a la frontera exterior, ya que se desplaza material de alrededor del indentador disminuyendo así la resistencia a la penetración por parte del material.

En el caso de la muestra circular del inicio de la extrusión, también la dureza en el centro fue menor a la dureza promedio de la muestra, para luego incrementarse en los siguientes 25mm y caer nuevamente en la zona perimetral, de manera similar a como sucedió en la muestra cuadrada. Por el contrario, en la muestra circular del final de la extrusión se presentó la mayor uniformidad en todas las mediciones.

Observamos que en cada una de las muestras a partir de la dureza en el centro, presentaban un aumento de la dureza en la zona intermedia para disminuir nuevamente en la zona perimetral. Hay que tomar en cuenta que estas variaciones tienen su origen en la naturaleza no homogénea del patrón de flujo, ya que la zona de la periferia es la zona que se somete a una deformación más severa debido al efecto de la fricción y al del esfuerzo cortante.

La variación en las durezas entre las dos muestras de perfil circular que corresponden a una misma extrusión sin duda se deben a que la fricción y el esfuerzo cortante se incrementa hacia el extremo final de la extrusión resultando en un aumento de la temperatura por arriba de las otras partes del tocho.

De los resultados de las microdurezas Vickers.

De las muestras circulares del inicio y del final de la barra de extrusión, se realizó un mapeo desde la orilla de la barra hasta 3mm hacia el interior de la muestra. Las durezas promedio en los distintos casos a tratar fueron:

Muestra del inicio de la extrusión:	94.22
-------------------------------------	-------

Muestra del final de la extrusión:	96.73
------------------------------------	-------

Las durezas promedio en los primeros 0.5mm fueron:

Muestra del inicio de la extrusión:	94.98
-------------------------------------	-------

Muestra del final de la extrusión:	97.23
------------------------------------	-------

Las durezas promedio entre los 0.6mm-1.1mm fueron:

Muestra del inicio de la extrusión:	94.57
Muestra del final de la extrusión:	97.67

Las durezas promedio a partir de los 0.6mm fueron:

Muestra del inicio de la extrusión:	94.98
Muestra del final de la extrusión:	97.27

Las primeras mediciones, que están próximas a la capa superficial de la barra pudieron verse afectadas, debido a su cercanía con el borde y por eso resultaron mucho menores al promedio. Entre 0.6-1.1mm de la capa superficial de la barra, queda incluido el pico máximo en ambas muestras; ya hacia el interior de la muestra la dureza es un poco menor a este máximo.

De las muestras de perfil cuadrado, se realizaron dos mapeos; el primero, a partir de la capa superficial de uno de los lados hacia el interior de la misma. El segundo, a partir de una de las esquinas hacia el interior de la muestra.

Durezas promedio del primer mapeo:

En los primeros 0.8mm	91.67
Dureza promedio de todo el mapeo	94.49

Durezas promedio del segundo mapeo:

Dureza promedio en todo el mapeo	99.97
Dureza en los primeros 0.4mm	98.86
Dureza promedio entre 0.8-2.6mm	101.49

Observamos que en el primer mapeo no se presenta un gran pico como en las muestras circulares, sino que la dureza es más uniforme; sin embargo, en el segundo mapeo sí se presenta el pico, considerando que las mediciones cercanas a la capa superficial de la barra se pudieron ver afectadas por la cercanía a la misma, en los

siguientes 2mm es donde se presenta el pico, para después disminuir ya hacia el centro de la muestra.

De los resultados de las microestructuras.

Para el caso de la muestra de perfil cuadrado correspondiente al extremo inicial de la extrusión, las fotografías en la zona perimetral a través de la sección transversal mostraron textura de bandas, debida principalmente a que esa zona sufre mayor deformación ya que aumenta la fricción y el esfuerzo cortante en esa zona, así como también, aumenta la temperatura por este efecto y en un período de tiempo muy corto, de unos 10 milisegundos, se provoca que una capa muy superficial del perfil eleve su temperatura, pudiendo llegar por arriba de la temperatura eutectoide (270°C) sufriendo una transformación de fase. En este caso, el aumento de temperatura es evidente, ya que al salir el producto, se enfría inicialmente la cáscara o capa superficial de la barra causando que se forme esa textura de bandas que fotografiamos. Así también, se observó la textura de bandas en las esquinas de la barra, ya que el calor generado por la fricción tiende a concentrarse en las esquinas y recovecos del perfil.

En el resto de las fotografías a lo largo de la sección transversal muestran una estructura similar con granos de fase α , (rica en aluminio) distribuidos al azar, dominios de fase B (rica en zinc) y dominios atrapados de perlitina fina. En algunas fotografías se aprecian precipitados negros denominados precipitados gama, constituidos por Fe, Mn, Si y Al que se identifican claramente porque poseen formas geométricas regulares como cuadrados, rectángulos y triángulos.

En las fotografías tomadas a través de la sección longitudinal se observó naturalmente la textura de bandas con orientación en dirección del eje de la extrusión.

Para el caso de la muestra circular correspondiente al inicio de la extrusión las

estructuras son de lo más semejantes al caso de la muestra cuadrada (ambas de inicio de su extrusión). En las fotografías nuevamente se observó en la zona de la capa superficial en la sección transversal de la barra la textura de bandas, que hasta 1mm hacia el interior se aprecia claramente. Todavía hasta los 2mm de distancia desde la orilla, apenas se alcanza a apreciar vestigios de la textura de bandas. Las fotografías correspondientes al lomo de la barra como la fig.54, y del canto de la barra como la fig.56, presentaron nuevamente la textura de bandas con orientación en la dirección del eje de extrusión. Se observan claramente precipitados negros con formas geométricas de rectángulo romboidal.

Sin embargo para el caso de la muestra de perfil circular del final de la extrusión la microestructura tuvo cambios muy importante con respecto a los del inicio de la extrusión. La estructura observada está formada por granos muy finos de fase α y de fase B. Y la distribución de los dominios es completamente uniforme. El incremento de los dominios de perlitina fina es importante, aunque su tamaño se redujo significativamente. No se observó textura de bandas alguna en la zona de la capa superficial de la barra, como se observaron en las periferias de la barra circular del inicio de la extrusión y en la barra de perfil cuadrado, que también corresponde al inicio de la extrusión.

La no presencia de textura de bandas en la zona de la capa superficial en la sección transversal de la barra se puede explicar seguramente a que el proceso de la extrusión no es uniforme. Como vimos en el capítulo 1, en el apartado C.2.a., en que la presión al inicio de la extrusión directa crece rápidamente mientras el tocho es aplastado y se acomoda a la recámara. Después de esto, la presión sigue creciendo hasta que comienza la extrusión; punto en el cual, al fluir el material forma una zona de deformación con forma de cono justo enfrente de la abertura del dado. Después de que

se ha alcanzado la máxima presión, ésta disminuye conforme la longitud del tocho disminuye hasta alcanzar un mínimo, y entonces se incrementa nuevamente hacia el final de la extrusión. Este último incremento ocurre debido a que en la cámara únicamente permanece un disco delgado y el metal es obligado a fluir radialmente hacia la abertura del dado, aumentando considerablemente la resistencia a la deformación.

Por otro lado, la influencia de la temperatura también es importante para explicar esta variación en las microestructuras del inicio del final de la extrusión: ya que entre menor sea la temperatura de las herramientas (dados), menor va a ser el calentamiento por fricción del perfil. La temperatura puede variar entre $180 \pm 30^\circ\text{C}$. A mayor velocidad de extrusión, mayor será la fricción y mayor el incremento de la temperatura en la superficie del perfil. La menor carga de extrusión se puede lograr extruyendo cerca de los 280°C , pero el aumento de la temperatura originado por el proceso de extrusión, eleva la temperatura del perfil por arriba de los 300°C , muy cerca de la temperatura donde se inicia la fragilidad en caliente del material (310°C). El efecto anterior se debe a que se comienza a reblandecer una capa existente entre los granos del material, con composición eutéctica que tiene punto de fusión de 386°C .(2)

Por todo lo anterior, se establece que idealmente se debería observar una misma microestructura en el inicio y el final de la extrusión, pero en la realidad suceden variaciones en presión, temperatura, y en la fricción, causados por la estructura del lingote y por la variación de la longitud del lingote en el proceso. Así también, por una mala distribución de temperaturas en la cámara, dado y herramientas, incluyendo al lingote.

REF:

- (1) Avitzur, Betzalel, Metal Forming: Processes and Analysis, Estados Unidos de Norteamérica, Ed. McGraw Hill, Inc., 1968.
- (2) Torres V., Gabriel, Extrusión del Zinco, Especificaciones de Ingeniería, Zinco Industrial, División de Ingeniería, México.

CONCLUSIONES.

En base a los resultados obtenidos, podemos afirmar que el zinco es un metal que puede ser extruido con éxito, ya que podemos considerarlo como un material estructural dentro de la industria de la construcción. Las propiedades mecánicas del zinco permiten su aplicación en perfiles estructurales y ornamentales.

La microestructura predominante como resultado de la extrusión consiste de dominios de perlita (constituyente pro-eutectóide) compuesto básicamente por zinc (fase β), el cual aparece blanco en las fotografías, que en la mayoría de los casos está alineado en la dirección del eje de la extrusión del perfil de donde procede la muestra, y por dominios de fase α compuesto básicamente de aluminio, que aparece de tono oscuro en las fotografías; y además, en algunos casos por un precipitado negro caracterizado por el nombre de precipitado gamma, constituido principalmente por Fe, Mn, Si y Al y que adquiere formas geométricas regulares, como son cuadrados, rectángulos y triángulos claramente observables. Los granos de las fases α y β son tan finos que sólo pueden ser observables con la ayuda de los dispositivos de microscopía electrónica, ya que su ancho o diámetro es menor a los 10 μm .

Se presentó el defecto de "banana" o de combadura en la muestra de perfil cuadrado, éste era apreciado a simple vista y es debido a que las herramientas empleadas en la extrusión del zinco son convencionales para la extrusión del aluminio. Por otro lado, se

ha establecido por experiencia que la distorsión se origina por el patrón de flujo del material, pero principalmente por la geometría que se tenga en el dado, y se ha demostrado que un dado para extruir aluminio no es el óptimo para extruir zinc. Es por esto, que se propone la participación de un experto en fabricación de herramientas para que se realicen pruebas modificando ligeramente la geometría del dado para tratar de contrarrestar las curvaturas no deseadas; esto es, para la barra de perfil cuadrado, los bordes del dado deberán curvarse en sentido contrario a la combadura que apreciamos a simple vista para obtener la rectitud en el producto o el perfil deseado, ya que lo que se realiza actualmente para corregir este defecto en los casos en que se requiera que los perfiles tengan una precisión superior a 0.1mm es someterlo a un enderezado o a una reducción para dar las dimensiones específicas. Esto sólo se hace para pequeños porcentajes, ya que no se recomienda para grandes porcentajes puesto que se puede alterar la dureza del material por deformación o provocar cuellos en el producto. En las muestras circulares no se observó a simple vista alguna distorsión en el perfil, ya que el flujo no es tan complicado como en el caso de la barra de perfil cuadrado; pero al tomar mediciones sí se apreció cambios en las dimensiones con respecto a las deseadas, variaciones debidas también a la geometría del dado.

Se presentó el defecto de variación de la estructura a lo largo de la sección transversal de la extrusión y a lo largo de la extrusión, causado por la fricción entre el tocho de material y las paredes del dado y del conector, así como también, por el aumento del esfuerzo cortante al final del proceso. Así, las diferencias estructurales pueden explicarse como variaciones en estas variables, que cambian de aleación en aleación, dando origen a distintos fenómenos.

Al iniciarse el enfriamiento fuera del dado, el perfil sufre distorsiones debido al cambio de volumen que sufre sólo la superficie al regresar a sus fases originales, ya que

la fricción puede provocar que la temperatura se eleve por arriba de los 275°C y ocasionar un cambio de fase en el material, esto es, $\alpha + \beta \rightarrow \alpha'$, ver diagrama de fases fig.37. El calor generado por la fricción tiende a concentrarse más en las esquinas y recovecos del perfil.

La variación en las durezas en la sección transversal, se deben principalmente a la naturaleza no homogénea del patrón de flujo en cada caso, ya que la zona de la capa superficial es la que sufre una deformación más severa debido a la fricción y al esfuerzo cortante. Así también, a que la fricción y el esfuerzo cortante se incrementan hacia el extremo final de la extrusión, incrementándose la temperatura.

Por todo lo anterior, es importante hacer notar que en realidad no existe aún un método definido a seguir, en lo que se refiere a la extrusión del Zinalco. Como hemos visto, se manejan amplios rangos de especificaciones para el proceso y no se cuenta con la forma óptima para realizar el trabajado del zinalco, es por esto, que el programa al que está siendo sometido de caracterización de propiedades debe de proseguir.

BIBLIOGRAFIA

- DIETER, George E., Mechanical Metallurgy, Inglaterra, Ed.McGraw Hill Inc., 1988.
- NIEBEL, Benjamin W., DRAPER, Alan B. y WYSK, Richard A., Modern Manufacturing Process Engineering, Singaporc, Ed.McGraw Hill Inc., 1989.
- TORRES V., Gabriel, APUNTES DE METALOGRAFIA, México, 1990.
- TORRES V., Gabriel, Zinco, Once años de investigaciones sobre esta aleación, México, Ed. OFA, 1990.
- TORRES V., Gabriel, "El zinco", COMUNICACIONES Y ELECTRONICA, México, año 1, núm.2, Verano de 1990.
- TORRES V., Gabriel, Extrusión del Zinco, Especificaciones de Ingeniería, Zinco Industrial, División de Ingeniería, México.
- MEYERS, Marc André y CHAWLA, Krishan Kumar, Mechanical Metallurgy: Principles and applications, Estados Unidos de Norteamérica, Ed.Prenice Hall, Inc., 1984.
- ROSTOKER, William y DVORAK, James R., Interpretation of Metallographic Structures, Inglaterra, Ed.Academic Press, 1977, (2da.Edición).
- BLAZYNSKY, T.Z., Tool Profiles and Flow, Inglaterra, Ed.The Macmillan Press LTD, 1976.
- METALS HANDBOOK, Forming and Forging, Estados Unidos de Norteamérica, Ed.ASME Inc., 1989, vol.14.
- METALS HANDBOOK, Metallography and Microstructures, Estados Unidos de Norteamérica, Ed.ASME Inc., 1989, vol.9.
- AVITZUR, Betzalel, Metal Forming: Processes and Analysis, Estados Unidos de Norteamérica, Ed.McGraw Hill, Inc., 1968.
- AVITZUR, Betzalel, Handbook of Metal-forming processes, Estados Unidos de Norteamérica, Ed.John Wiley & Sons, 1983.
- LAUE, Kurt y STINGER, Helmut, Extrusion, Processes, Machinery, Tooling, (Trad. A.F.Castle y Gernot Lang), Estados Unidos de Norteamérica, Ed.ASME, 1981.
- HEARLE, J.W.S., SPARROW, J.T. y CROSS, P.M., The use of the Scanning Electron Microscope, Inglaterra, Ed.Pergamon Press, 1972.