

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1970

04.70.15

PMM/C-40

Comisión Nacional de Energía Atómica
dependiente de la Presidencia de la Nación

REFINAMIENTO DE GRANO POR ADITIVOS EN AI Y SUS ALEACIONES

R. Morando, J. Fissolo y H. Biloni

PROGRAMA MULTINACIONAL DE METALURGIA

Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico - OEA

IV Jornadas Metalúrgicas
Sociedad Argentina de Metales
Córdoba, noviembre de 1970

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina

REFINAMIENTO DE GRANO POR ADITIVOS EN Al Y SUS ALEACIONES

R. Morando (*), J. Fissolo (**) y H. Biloni (*)

Se analiza el grado de refinamiento de grano obtenido en Aluminio de pureza 99,99 % y aleaciones Al-Cu de diferentes tenores de Cu, por la adición de cantidades variables de aditivos a base de Boro y Titanio.

Se consideran diferentes variables del proceso de solidificación y sus efectos sobre la estructura resultante:

- i) extracción calórica a través de las paredes del molde
- ii) movimiento del líquido durante el proceso de solidificación
- iii) control de las corrientes convectivas por medio de campos magnéticos, movimientos rotatorios del líquido y movimientos alternativos programados del líquido.

Los resultados son discutidos a la luz de las diferentes teorías existentes en la literatura.

(*) Departamento de Metalurgia, CNEA

(**) C.I.M. Universidad Nacional de Córdoba

REFINAMIENTO DE GRANO POR ADITIVOS EN
ALUMINIO Y ALEACIONES Al-Cu

R. Morando (*), J. Fissolo (**) y H. Biloni (*)

I - INTRODUCCION

a) Métodos de Refinamiento de Grano

Una de las más antiguas preocupaciones de investigadores y metalurgistas ha sido el tamaño y la distribución de los granos en lingotes y piezas fundidas. Es aceptada como una norma general el hecho que un tamaño de grano pequeño mejora las propiedades mecánicas de la pieza. Esta norma, sin embargo debe tomarse con cuidado, toda vez que en los últimos años los investigadores han dejado de aceptarla en forma taxativa para comenzar a analizarla en cada caso particular. Paralelamente, hoy día es conocido el hecho que no solamente tiene importancia el tamaño de grano, tal cual puede ser visualizado por un ataque macrográfico, sino la subestructura asociada a los granos, esto es, morfología del crecimiento dendrítico, tamaño y distribución de las fases segregadas, porosidad asociada a la subestructura, etc. (1).

Los métodos de refinamiento de grano son numerosos, como un resultado de la extensiva investigación desarrollada en la última década. Cole y Bolling (2) han hecho un excelente resumen de los diferentes métodos utilizados, los cuales pueden ser divididos de la siguiente forma:

I) Variaciones de las condiciones térmicas del medio

Esencialmente el método consiste en un brusco flujo calórico desde el líquido hacia una fuente fría, la que puede estar constituida por las paredes del molde u otro tipo dado ("chills"). Este flujo calórico produce un alto sobreenfriamiento del líquido lo que se traduce en un alto número de núcleos en condiciones de crecer y dar lugar a un grano fino. Este método, además, tiene en cuenta no solamente el flujo calórico sino el flujo de masas, que en general se encuentra asociado al mismo a través de la operación de llenado del molde y de las corrientes convectivas generadas en el líquido. Este flujo tiene responsabilidad en la distribución de los granos formados en las áreas sobreenfriadas así

(*) Departamento de Metalurgia, CNEA

(**) C. I. M. Universidad Nacional de Córdoba

como en la eventual multiplicación de los granos durante su vencimiento. Es conocida la relación entre el flujo convectivo y los mecanismos de arrancado y/o refusión localizada de ramas secundarias y terciarias de dendritas (3-4). El método al que se está haciendo referencia es el que se tiene en cuenta para racionalizar el origen y desarrollo de la zona chill de los lingotes (5-6), así como el de la zona equiaxial central cuando el sobreenfriamiento no es elevado (7-8). Procesos que aún no han pasado de la escala de laboratorio como el "splat cooling" (9-10), procesos tecnológicos tradicionales como el colado en lingoteras metálicas y procesos relativamente modernos como el "die casting" aprovechan de este método en la formación de estructuras de grano fino. Una variante del método consiste en sobreenfriar todo el líquido por muchos grados por debajo del punto de fusión para luego inducir la nucleación. Este método, que en los últimos años ha sido extensivamente investigado, a partir de los trabajos originales de Walker (11), presenta variaciones bruscas del tamaño de grano según la cantidad de sobreenfriamiento del líquido. La neta reducción del tamaño de grano a partir de un sobreenfriamiento crítico (175°C en el caso del Ni) es atribuido a fenómenos de cavitación por algunos autores (11-12) o de multiplicación por otros (13).

II) Variaciones en la concentración

Desde el punto de vista de los fenómenos asociados a la nucleación de cristales dentro de una muestra que solidifica, puede considerarse las variaciones de concentración. Es evidente que en los casos prácticos la nucleación es siempre heterogénea y las partículas que actúan como centros de nucleación pueden ser agregadas de expreso o no. En este último caso el tipo, tamaño y distribución de los granos depende fuertemente de las condiciones térmicas y constitucionales del sistema. Aunque cuatro teorías intentan explicar el origen de la estructura equiaxial de los lingotes (3) (14-16) puede afirmarse que el mecanismo operativo ha de depender de las condiciones térmicas impuestas al sistema, para una condición constitucional dada (8). Las consideraciones hechas anteriormente, válidas en general para el caso de aleaciones que no presentan una segunda fase pueden cambiar en el caso en que aparezcan segundas fases. En este sentido, aunque el problema no haya sido totalmente clarificado, son importantes los trabajos de Sundquist y Mondolfo (17-19). Aparentemente la fase sólida que tiene una estructura más compleja es un buen nucleante de la fase que tiene una estructura más simple. Este estudio ha sido hecho para el sistema Pb-Sn y allí el Sn (tetragonal) es un buen nucleante del Pb (FCC) pero lo inverso no ocurre. Las relaciones peritéticas parecen ser muy efectivas como creadoras de centros de nucleación, tal como se analizará más adelante para el caso específico de la adición de Ti al Aluminio. La existencia de fases del tipo de los óxidos, carburos, etc., resultantes del proceso de producción del material pueden aportar nucleantes efectivos. Sin embargo la forma en que actúan, ya sea por efec-

tos de epitaxia, parámetros de red similares al del metal nucleado, microperfil de la superficie de la partícula, etc., etc., aún no han podido ser resumidos en una teoría coherente (1).

Cuando los elementos nucleantes son agregados exprofeso reciben el nombre de aditivos o nucleantes. El agregado de nucleantes debiera de estar estrechamente vinculado a la comprensión de los mecanismos de nucleación heterogénea. Estos, aunque pueden ser formalmente descriptos en forma más o menos simple (20) no alcanzan a predecir la incorporación de un nucleante específico en una aleación dada. La obtención de un nucleante efectivo sigue siendo una tediosa operación empírica (21). Lo único que se conoce es una serie de recetas, siendo el único hecho comprobado aquel que fija que un nucleante efectivo debe formarse por una reacción en el líquido de manera que la interface nucleante-líquido sea "limpia" y por consiguiente pueda operar como núcleo heterogéneo (21).

III) Interacción con campos externos

Estos métodos suponen la aplicación de fuerzas externas al sistema que solidifica de manera de actuar sobre dos mecanismos: i) aumentar la frecuencia de nucleación, o, ii) producir un efecto multiplicador de los granos ya formados. En el primer caso el aumento de la nucleación es atribuible a la cavitación vía la ecuación de Clausius Clapeyron. El método más utilizado de obtener cavitación es por medio de ultrasonido (22). Ello es efectivo en escala de laboratorio pero absolutamente prohibitivo en escala industrial. El segundo método consiste esencialmente en perturbar la interface Sólido-Líquido que crece por medio de una fuerza capaz de arrancar trozos de dendritas, los que incorporados al seno del líquido pueden dar lugar a nuevos granos. Los métodos a utilizar son numerosos y no entraremos en detalles sobre los mismos. En general se basan en forzar corrientes convectivas frente a la interface, aunque pueden ser utilizados efectos mecánicos u ondas ultrasónicas cuando el transductor se aplica sobre la interface Sólido-Líquido. Dentro de este esquema los métodos más utilizados son: a) utilización de ultrasonido (22); b) vibraciones mecánicas (23-28); c) burbujeado de gas en el líquido (7) (29), d) campos magnéticos rotatorios (30)(31), e) interacción de campos magnéticos y eléctricos (32-33); f) oscilaciones del molde (23) (34). En muchos de estos casos, especialmente en el último, que es el más controlable y económico, es posible la obtención de una acentuada disminución del tamaño de grano.

En este trabajo nos hemos de referir a uno solo de los métodos enunciados: el de refinamiento de grano por medio de aditivos, y dentro de él al caso específico del Aluminio y aleaciones Al-Cu refinadas por medio de aditivos a base de Ti y B. El hecho, ya apuntado, que no exista una teoría que permita predecir volitivamente un nucleante específico obliga a este tipo de parcializaciones. El traba

jo intenta dar un panorama de las estructuras resultantes cuando diferentes condiciones de flujo calórico y de masas son impuestas al sistema.

b) Refinamiento de Grano por Aditivos en Aluminio y sus Aleaciones

Es conocido desde hace tiempo el efecto refinador del Ti y el B agregados en forma de sales, así como el de la combinación de ambos elementos. Recientemente Glasson y Emley (35) han hecho un extenso resumen de las diferentes teorías que intenta explicar los mecanismos de refinamiento de grano por medio de este tipo de aditivos. El presente trabajo no ha de discutir los mecanismos de refinamiento de grano del Aluminio y sus aleaciones. Se ha de limitar a estudiar el efecto del porcentaje de sales agregadas y el del flujo de masas y de calor sobre las estructuras obtenidas. Para ello hemos de utilizar sales comerciales Foseco (Nucleant 2) a base de Boro y Titanio. Sin embargo, para referencia del lector, los mecanismos de refinamiento de grano para el caso que se ha de tratar han sido clarificados recientemente. Para el caso de adición de sales de Ti, Kiss y Biloni (36) han determinado que la reacción peritética $Al_3Ti + L = Al$, es la responsable de la formación de centros de nucleación que posibilitan la obtención de un grano fino. Por su parte Davies y escritores (37) discuten los mecanismos de refinamiento de grano por adición de sales de Ti y B.

c) Flujos de Calor y de Masa Durante la Solidificación

El proceso de solidificación de un lingote o una pieza de fundición puede desarrollarse en la medida que tanto el calor latente de solidificación cuanto el sobrecalentamiento del líquido pueda ser eliminado. El tratamiento de este problema ofrece dificultades toda vez que se trata de un caso no estacionario (38). Por consiguiente la búsqueda de soluciones matemáticas ha obligado a diferentes autores a realizar toda una serie de simplificaciones que alejan al problema de sus dimensiones reales. No es el objetivo de este trabajo tratar el problema de transferencia calórica a través de las paredes del molde pero resulta intuitivo considerar que la conductividad térmica de las paredes del molde así como la naturaleza de la interface metal molde (39) juegan un papel decisivo en la capacidad de extracción del calor latente de solidificación y del sobrecalentamiento del líquido.

Por otra parte el proceso de solidificación da lugar a un flujo de masas. Los orígenes de ese flujo de masas son principalmente dos: i) El proveniente del llamado "momento convectivo" que corresponde a la entrada del líquido en el molde (3). ii) Las corrientes convectivas naturales provenientes de las diferencias de temperatura existentes en el sistema (40). Estas corrientes proveen una de las formas más efectivas de transferencia calórica, por consiguiente, la amortiguación o aumento de las mis-

mas ha de dar como resultado un aumento o disminución de los gradientes térmicos existentes en el líquido. Ello se ha de traducir en diferencias estructurales de importancia. En efecto: el aumento del gradiente de temperatura en las adyacencias de la interface Sólido-Líquido ha de dificultar la supervivencia de cristales sólidos situados en esa zona. Es conocido el hecho que los mismos, nucleados en esa zona o provenientes de mecanismos de multiplicación, sólo pueden sobrevivir cuando existe Sobreenfriamiento Constitucional, cuya importancia está ligada directamente al valor del gradiente térmico existente en el líquido (12). Por el contrario, una disminución del gradiente térmico favorece la supervivencia de dichos cristales.

Fundamentalmente existen dos métodos de control del flujo de masas resultante de las corrientes convectivas: a) Utilización de campos magnéticos: un campo magnético ubicado perpendicularmente a las líneas de flujo convectivo induce en el líquido corrientes parásitas que tienden a oponerse al movimiento del líquido (41). La resultante es una disminución de la transferencia calórica, la que tiende a ser exclusivamente por conducción. Ello se traduce en un aumento del gradiente de temperatura existente en el líquido. Por otra parte, como ya ha sido referido, campos magnéticos rotatorios inducen un movimiento giratorio en el líquido. Ello fuerza la convección mejorando el flujo calórico disminuyendo los gradientes de temperatura. b) Efecto Coriolis: en este caso la rotación del líquido alrededor del eje longitudinal del molde provee una fuerza de Coriolis que impulsa las partículas del líquido en una dirección normal al eje de rotación y normal a la dirección del movimiento de la partícula (42). El resultado es análogo al obtenido por medio de la aplicación de un campo magnético; la convección se amortigua fuertemente, disminuye la transferencia calórica por lo que aumentan fuertemente los gradientes térmicos existentes en el líquido. Tanto en este caso, cuanto en el correspondiente a la aplicación de un campo magnético, la amortiguación de las corrientes convectivas puede ser detectada por medio de termocuplas de alta sensibilidad que miden las disminuciones de las fluctuaciones térmicas a medida que las corrientes convectivas son suprimidas (43). En los sistemas en que el líquido es obligado a rotar, la transferencia calórica en el líquido puede ser forzada por medio de oscilaciones del líquido obtenidas por medio de rotaciones alternadas del molde (34) (42). El resultado es la fuerte disminución de los gradientes de temperatura.

2) TECNICAS EXPERIMENTALES

a) Materiales utilizados

Se utilizó Aluminio de pureza 99,99 % y aleaciones Al-2 % Cu. La pureza del Cobre fué 99,99 %. El aditivo utilizado fué la sal Foseco Nucleant 2, a base de B y Ti, en porcentajes variables entre 0,08 % a 0,5 % en peso. Los lingotes

tenían un volumen de aproximadamente 500 cc y 5000 cc. De acuerdo a trabajos anteriores (8) es posible sacar conclusiones similares en ambas escalas de volumen. Las medidas de las lingoteras de grafito utilizadas figuran en el trabajo citado (8).

b) Técnicas de adición

El Aluminio o la aleación Al-Cu utilizada fueron fundidos en un horno de frecuencia (10.000 C/seg). A los 750°C se agregaron las sales por inmersión y por medio de una campana de grafito que llegaba hasta el fondo del crisol. Subsecuentemente la temperatura fué elevada hasta los 820°C. La temperatura de colada utilizada en todos los casos fué la correspondiente a 100°C de sobrecalentamiento. Este sobrecalentamiento es el aconsejado por Foseco. Asimismo trabajos de Cole y Bolling (44) determinaron que ese sobrecalentamiento es el que produce el refinamiento más efectivo.

c) Control del flujo calórico y de masas

La Fig. 1 indica el campo magnético utilizado (45). El pasaje de 1200 Amp. por las espiras de los polos da como resultado un máximo de 2100 Gauss en el centro del campo. Esta intensidad del campo es más que suficiente para la eliminación de las corrientes convectivas (41). Por su parte la Fig. 2 indica el dispositivo utilizado para la amortiguación o forzado de las corrientes convectivas por medio de movimientos rotatorios y/o alternativos del molde (46). El plato rotatorio puede ser variado desde 0 a 150 rpm. Asimismo es posible cambiar la dirección de rotación así como la programación de dichos cambios de rotación.

3) RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados experimentales pueden ser agrupados y discutidos según el siguiente esquema:

I - ALUMINIO 99,99 %

a) Lingotes colados en forma convencional

Se analizó los resultados obtenidos sobre el tamaño de grano en función de la cantidad de sales adicionadas. La obtención de un refinamiento de grano aceptable hace necesario la adición de un porcentaje mínimo de sales. Las experien-

cias realizadas en lingotes de 500 cc indican que ese porcentaje mínimo es del orden de 0,25 %. Las Figs. 3a)-c) ilustran las estructuras obtenidas con 0,15%, 0,25 % y 0,50 % de sales respectivamente. El porcentaje de sales agregadas condiciona el número de núcleos operativos en el seno del líquido. Sin embargo, una cantidad demasiado grande de sales aditivas puede ser perjudicial debido a la eventual aparición de fases frágiles en los bordes de grano y espacio interdendríticos (1), lo que tornaría el método de adición altamente perjudicial.

b) Lingotes colados bajo campo magnético

Las estructuras resultantes en este caso se encuentran ejemplificadas, para tenores crecientes de sales aditivas en la Fig. 4a)-b), correspondientes a 0,5 % y 0,25 % de aditivo respectivamente, en lingotes de 5000 cc. A medida que disminuye el porcentaje de aditivo la zona columnar ocupa un mayor volumen en el lingote. Ello puede ser explicado teniendo en cuenta las condiciones térmicas impuestas al sistema por el campo magnético así como consideraciones constitucionales. En efecto, el aumento del gradiente térmico en el líquido, resultado de la eliminación de la convección, tiende a disminuir el Sobreenfriamiento Constitucional existente en la vecindad de la interface Sólido-Líquido. Es muy posible (20) que en la zona sobreenfriada constitucionalmente se nucleen los cristales sobre las partículas aportadas por el aditivo. Por consiguiente, para una misma cantidad de aditivos la aplicación del campo magnético se traduce en una mayor zona columnar toda vez que la zona columnar debe avanzar un mayor espacio hasta alcanzar las condiciones de sobreenfriamiento constitucional críticas. (Fig. 3b y 4b). Sin embargo el efecto del aditivo no es solamente proveer partículas que actúen como núcleos heterogéneos. Los elementos que posee el nucleante pueden formar aleaciones, del tipo A-Ti-B en el caso que estamos tratando; por consiguiente una mayor cantidad de aditivo tiende a introducir una mayor cantidad de soluto en ese tipo de aleación lo que a su vez aumenta la cantidad de Sobreenfriamiento Constitucional (12) para una dada condición térmica. Es evidente que el resultado será una transición columnar-equiaxial más rápida lo que se ha de traducir en un mayor volumen de lingote con grano equiaxial pequeño.

c) Efecto del tiempo total de solidificación sobre las estructuras resultantes

En esta parte del trabajo se analiza el efecto del tiempo de solidificación sobre la estructura resultante. El porcentaje de sales utilizado ha sido de 0,25%. El tiempo de solidificación ha sido controlado variando la extracción calórica a través de las paredes del molde. Con ese fin se utilizaron los siguientes tipos de lingotera: a) Lingotera de Cobre: tiempo de solidificación: 67 seg. b) Lingotera

de grafito: tiempo de solidificación: 130 seg. c) Lingotera de grafito pintada con Alúmina: tiempo de solidificación: 255 seg. d) Lingotera de grafito pintada con alúmina y calentada a 500°C : tiempo de solidificación: 345 seg. Tanto la variación de la conductividad térmica del material de la lingotera, cuanto la naturaleza del coeficiente de transmisión de la interface metal-molde (39) (4) son los que regulan la extracción calórica y por consiguiente el tiempo de solidificación. Las Figs. 5a)-d) indican el tipo de estructura obtenida. Puede observarse que el refinamiento de grano mejora a medida que aumenta el tiempo de solidificación hasta alcanzar el mejor grado en la Fig. 5c). Sin embargo, un aumento posterior del tiempo de solidificación se traduce en una marcada decantación de los granos (Fig. 5d).

Estos resultados pueden ser discutidos teniendo en cuenta que la reacción que da lugar a los núcleos heterogéneos (muy posiblemente una reacción peritética en este caso (37) (38) tiene una cinética dada para cada caso. Por consiguiente si el tiempo es muy corto no pueden formarse suficiente número de núcleos operativos capaces de formar una red de granos equiaxiales que detengan el avance de los granos columnares. Este efecto es observable en forma neta para cantidades relativamente bajas de sales. Una cantidad grande de sales siempre ha de asegurar suficiente cantidad de núcleos operativos, aún con tiempos cortos de solidificación. Por otra parte, un tiempo muy largo de solidificación hace que los granos nucleados en el seno del líquido tiendan a decantar, Fig. 5d), como resultado de su mayor densidad. Ello se traduce en una estructura inhomogénea y por consiguiente en propiedades cuyos valores pueden presentar gran dispersión.

II - ALEACIONES Al-2 % Cu

a) Lingotes colados en forma convencional

Los lingotes Al-2 % Cu necesitan una cantidad de aditivo menor que los de Al 99,99 % para obtener una distribución homogénea de grano fino. Pese a ello también en este caso a medida que aumenta el porcentaje de sales el tamaño de grano se hace más pequeño. Esto puede ser observado en la Fig. 6a) y b) que corresponde a estructura de lingotes de Al-2 % Cu colados convencionalmente y con 0,08 % y 0,2 % de sales como aditivo, respectivamente.

La mejor distribución de los granos así como la menor cantidad necesaria de aditivo para producir un determinado tamaño de grano puede ser explicada por la acción del Cobre. Este soluto, con un coeficiente de partición de 0,12 al segregarse en frente de la interface sólido-líquido colabora en la obtención de la cantidad de Sobreenfriamiento Constitucional crítica necesaria para la nucleación y supervivencia de los cristales. Este efecto es similar, desde el punto de vista cons-

titucional, al discutido anteriormente para el caso del aumento de aditivo en Aluminio 99,99 %. En este caso es el Cobre y no el exceso de B y/o Ti el que crea las condiciones de Sobreenfriamiento Constitucional necesarias para la supervivencia de los cristales nucleados heterogéneamente.

b) Lingotes colados bajo campo magnético

En este caso fueron analizados lingotes colados bajo campo magnético con 0,08 % y 0,2 % de sales como aditivo. La diferencia estructural con los lingotes colados en forma convencional (Figs. 6a) y b)) radica principalmente en la distribución de los granos equiaxiales. En el caso que nos ocupa es menos homogénea. Las Figs. 7a) y b) indican claramente la existencia de una banda de granos equiaxiales más finos en la periferia del lingote. Este efecto puede ser explicado de la siguiente manera: el campo magnético amortigua no solamente las corrientes convectivas naturales, sino el mismo momento convectivo (8). Por consiguiente, muchos de los granos nucleados en la zona chill (5-6) no pueden ser distribuidos en el resto del líquido. Un efecto análogo ha sido observado por Morando y coautores (8) en aleaciones Al-Cu coladas bajo campo magnético. En este último caso la estructura central de los lingotes estaba formada por granos columnares o equiaxiales de tamaño grande, de acuerdo a las condiciones térmicas y constitucionales del sistema. En el caso que nos ocupa la existencia de núcleos heterogéneos, provenientes de la adición de sales, da lugar en la zona central a un grano equiaxial de tamaño pequeño, pero de todas maneras mayor que el existente en la periferia. En esta última zona se superponen los dos mecanismos de formación de granos: el correspondiente a la zona chill (5-6) y el proveniente de los aditivos. Un mayor número de núcleos dará como resultado una banda de grano más pequeño.

III - ACCION PROGRAMADA DE CAMPOS ROTATORIOS Y MAGNETICOS

Trabajos muy recientes de Cole y Bolling (44) en Aluminio 99,99 % con aditivos Foseco han permitido dilucidar algunos detalles de la interacción existente entre los nucleantes y los flujos térmicos y de masas. Estos autores determinaron que la presencia de aditivos en el líquido da como resultado estructuras opuestas a aleaciones Al-Cu sometidas al mismo programa de acción de campos rotatorios y/o oscilatorios. Estas diferencias pueden ser resumidas: i) Cuando un campo oscilatorio es impuesto a un lingote Al-Cu que solidifica se inducen granos equiaxiales enfrente de la interfase Sólido-Líquido de los granos columnares. En el caso de Aluminio con aditivos la misma situación favorece la formación de granos columnares. ii) Cuando un campo rotatorio es impuesto al sistema, en una aleación Al-Cu, se favorece la aparición de granos columnares. Lo opuesto ocurre en el caso de Aluminio con aditivos en que se

favorece la formación de granos equiaxiales.

En esta sección del trabajo se han de detallar y discutir los resultados obtenidos en lingotes de 5000 cc de Aluminio con diferentes cantidades de aditivos así como diferentes programas de control del flujo térmico y de masas. Esto último por acción de campos rotatorios, rotatorios alternativos y magnéticos.

a) Movimientos rotatorios y oscilatorios

Se hicieron experiencias con Al 99,99 % sin aditivos y con adiciones de 0,15 %, 0,25 % y 0,50 % de sales. Se realizaron dos series de experiencias: una con rotaciones de 100 rpm y otra con rotaciones alternativas, también con 100 rpm. Las Figuras 8a)-d) indican los resultados obtenidos con rotaciones y diferentes cantidades de sales. Por su parte la Fig. 9a)-b) corresponde a movimientos alternativos. Los resultados pueden ser interpretados de la siguiente forma:

En el caso de Al 99,99 %, sin aditivos, la estructura columnar de la Fig. 8a) es la única posible toda vez que la poca cantidad de soluto, más el aumento del gradiente térmico en el líquido, como resultado del movimiento giratorio del mismo (42), inhibe la aparición de una estructura equiaxial. Por su parte la zona central equiaxial de la Fig. 9a) puede ser explicada en base a la multiplicación de granos que el movimiento del líquido puede producir en la interface Sólido-Líquido aún en el caso de la existencia de poco soluto (7) (42). Paralelamente el movimiento alternativo del líquido disminuye el gradiente de temperatura lo que permite la supervivencia y crecimiento de un número de trozos de dendritas arrancados a la interface.

Los lingotes con diferentes porcentajes de aditivos cuando son sometidos a un movimiento giratorio presentan una zona columnar, seguida de una equiaxial e inmediatamente una nueva estructura columnar central de grano fino. Este efecto disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sales (Figs. 8b)-d). Puede ser explicado teniendo en cuenta la fuerza centrífuga que opera sobre las partículas nucleantes. Cuando el porcentaje de dichas partículas es bajo, por ejemplo para el caso de adiciones de 0,15 % y 0,25 % de sales, la mayor parte de los nucleantes son impulsados hacia la periferia quedando la zona central empobrecida en esos elementos. A medida que aumenta el porcentaje de sales el número de nucleantes que queda en la zona central aumenta por lo que puede obtenerse un grano equiaxial pequeño (Fig. 8d). Cuando el lingote solidifica bajo la acción de movimientos alternativos los nucleantes tienden a distribuirse en el seno del líquido lo que se traduce en una formación de una zona equiaxial. La Fig. 9b) con 0,15 % en sales ejemplifica este fenómeno. Estos efectos de distribución de partículas en el seno de un líquido sometido a movimientos rotatorios o alternativos han sido comprobados usando símilos transparentes (4).

b) Movimientos alternativos y rotatorios combinados

En este caso se utilizaron lingotes de 500 cc y la cantidad de aditivo usada fue del 0,25 %. El programa de movimiento impuesto al sistema fué el siguiente: i) colado con 100 rpm; ii) mantenimiento de este movimiento durante 30 seg.; iii) durante 30 seg. fue impuesto un movimiento alternativo de la misma velocidad y en donde la dirección de rotación era cambiada cada 4 vueltas (42); iv) movimiento rotatorio por 30 seg. etc., La Fig. 10 indica la estructura resultante. Consiste de bandas alternadas de granos columnares y equiaxiales. Los granos columnares son coincidentes con la aplicación del movimiento alternativo y los equiaxiales con el movimiento rotatorio. Estos resultados son similares a los obtenidos por Cole y Bolling (44) y pueden ser explicados en forma análoga a lo anterior: en los momentos en que hay rotación, la fuerza centrífuga tiende a acumular a las partículas nucleantes contra la interface Sólido-Líquido. Allí el Sobreenfriamiento Constitucional permite la nucleación y crecimiento de los cristales. Cuando se impone una rotación alternativa, las partículas nucleantes son distribuidas hacia el seno del líquido por lo que se favorece el desarrollo columnar de los granos que están creciendo. El comportamiento opuesto de las estructuras con respecto a aleaciones coladas sin aditivos permite, tal como lo puntualizan Cole y Bolling, usar este tipo de programación para determinar si un aditivo es nucleante o no. Un comportamiento análogo al que ilustra la Fig. 10 indicaría que se trata de un nucleante efectivo.

c) Programación de campos magnéticos

Se investigó la posibilidad que una programación del campo magnético del tipo discutido anteriormente para los campos rotatorios, diera resultados análogos. En este caso la rotación continuada podría ser asimilada a la aplicación continua del campo magnético, mientras que la imposición de rotaciones alternativas podría ser asimilada a aplicaciones alternadas del campo magnético. Los resultados obtenidos con varios tipos de programaciones (48) muestran influencia sobre el tamaño y distribución del tamaño de grano pero no dan resultados del tipo discutido anteriormente. Ello es lógico de acuerdo a las siguientes consideraciones: la aplicación de campos rotatorios o magnéticos lleva a controles similares del flujo térmico a través de la influencia sobre la convección. Sin embargo el flujo de masas es completamente distinto. En efecto, la aplicación de campos rotatorios introduce el efecto de la fuerza centrífuga sobre las partículas nucleantes, tal como ha sido discutido. Ello entraña un flujo de masas radiales, es decir perpendicular a la interface Sólido-Líquido. Por su parte la aplicación de campos magnéticos alternativos producen un flujo de masas paralelas a esa interface, como resultado del movimiento de líquido en ese sentido (48). El resultado de este flujo de masas se hace sentir en la estructura pero no da un criterio selectivo claro del tipo que brinda la programación de los campos rotatorios.

IV COMENTARIOS FINALES

Este trabajo puede brindar una serie de conclusiones, que sin embargo los autores prefieren no explicitarlas. Prefieren dejarlas a juicio del lector, para en cambio llamar la atención sobre algunos otros aspectos, más generales, del refinamiento por medio de aditivos. Esta técnica sin duda muy efectiva aún no puede ser tratada en forma científica rigurosa toda vez que el pilar sobre la cual debe de descansar, la nucleación heterogénea, no es lo suficientemente comprendida. Del trabajo surge el hecho que no solamente ese aspecto fundamental debe ser entendido. Existen otras variables fundamentales que influyen el tamaño y distribución de los granos. En ese sentido creemos importante llamar la atención sobre la influencia que el tipo de flujo calórico y/o de masas ejercen sobre la estructura final. Su interacción con el porcentaje de aditivos así como la existencia o no de solutos aleantes hace aún más complicado el panorama. Sin embargo el avance del conocimiento en las leyes de la solidificación así como en la causa y control de los flujos calóricos y de masa permite ya poseer criterios cualitativos que tiendan a dilucidar, aunque sea en forma empírica, cuando un nucleante puede ser efectivo.

LEYENDA DE LAS FIGURAS

- Fig. 1 Campo magnético utilizado en las experiencias. a) distribución del campo, b) Equipo utilizado.
- Fig. 2 Instalación utilizada para imponer campos rotatorios y/o rotatorios alternativos a los lingotes durante la solidificación.
- Fig. 3 Estructuras obtenidas en lingotes de Al 99,99 % colados convencionalmente y diferentes cantidades de aditivos. a) 0,15 %; b) 0,25 %; c) 0,50 %.
- Fig. 4 Lingotes de Al 99,99 % colados bajo campo magnético de 2100 Gauss: cantidad de aditivos usados. a) 0,5 %; b) 0,25 %.
- Fig. 5 Estructura de Aluminio 99,99 % y 0,25 % de aditivo colado bajo diferentes condiciones de extracción térmica. a) Lingotera de Cobre; b) Lingotera de Grafito; c) Lingotera de Grafito pintada de Alúmina; d) Lingotera de Grafito pintada de Alúmina y calentada a 500°C.
- Fig. 6 Estructuras de lingotes de Al-2 % Cu colados convencionalmente y con diferentes cantidades de aditivos. a) 0,8 %; b) 0,2 %.
- Fig. 7 Estructuras de lingotes de Al-2 % Cu colados bajo campo magnético de 2100 Gauss y con diferentes cantidades de aditivos. a) 0,08 %; b) 0,2 %.
- Fig. 8 Estructuras de lingotes de Al 99,99 % colados bajo campo rotatorio de 100 rpm y con porcentajes variables de sales. a) 0 %; b) 0,15 %; c) 0,25 %; d) 0,50 %.
- Fig. 9 Estructuras de lingotes de Al 99,99 % colados bajo campo rotatorio alternativo (100 rpm) y con diferentes porcentajes de aditivos. a) 0 %; b) 0,15 %.
- Fig. 10 Estructura de un lingote de Al 99,99 % con 0,25 % de aditivo sometido a campos rotatorios y oscilantes en forma alternativa. Los granos equiaxiales corresponden a la operatividad del campo rotatorio. Los granos columnares a la operatividad del campo rotatorio alternativo u oscilante.

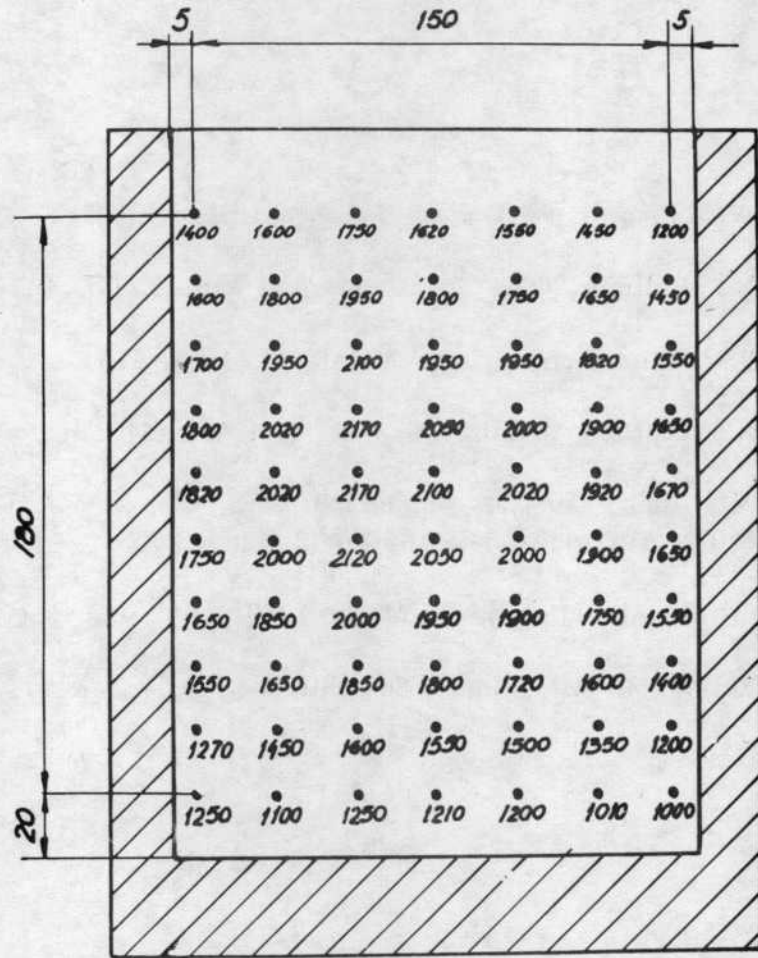


Fig. 1a

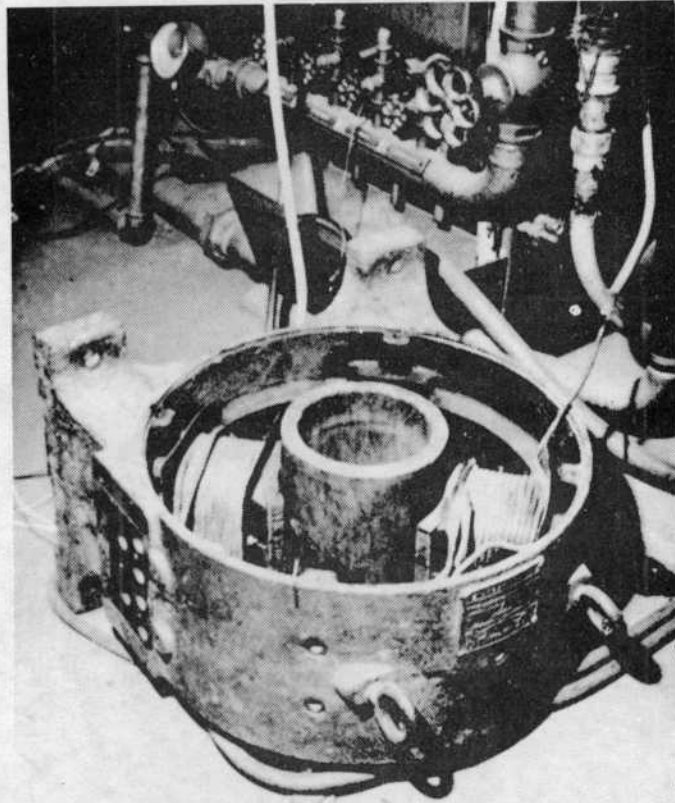


Fig. 1b

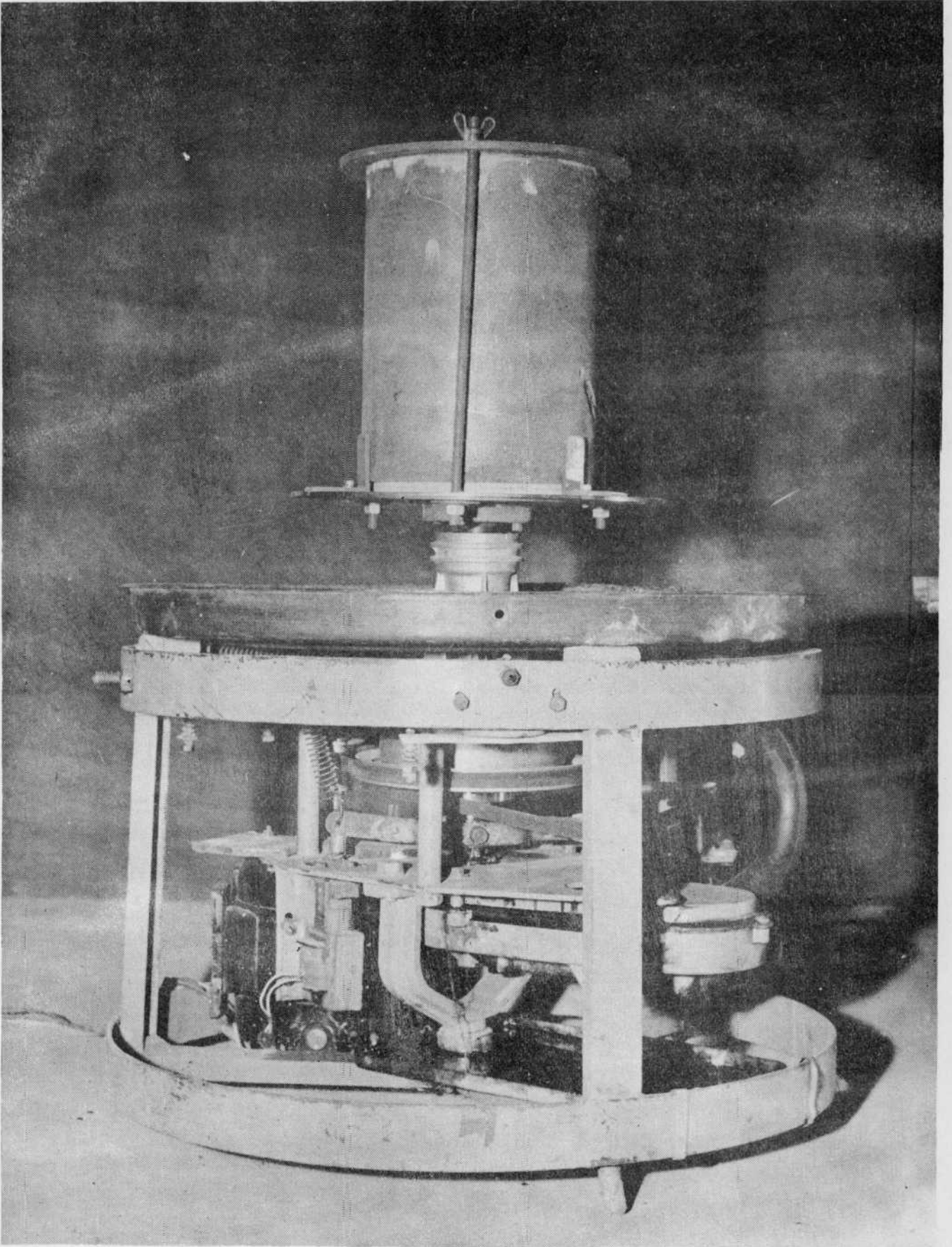
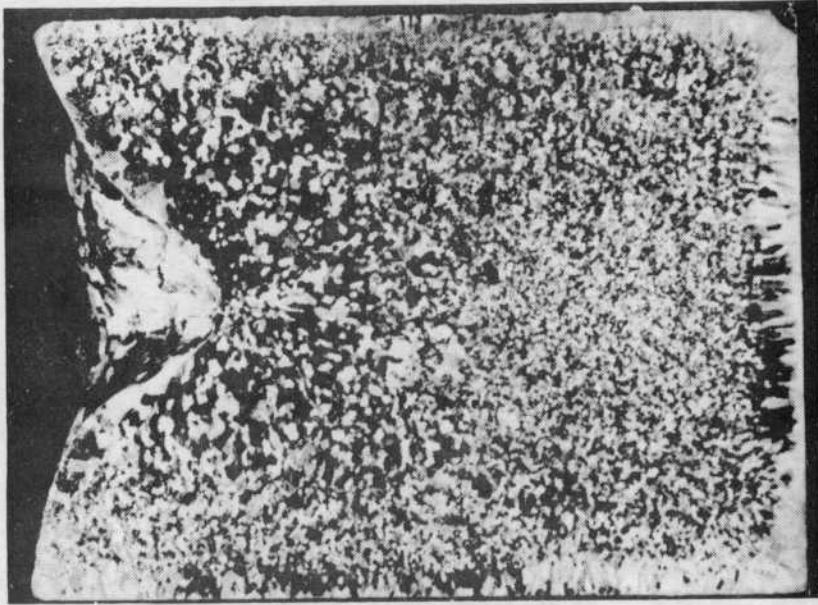
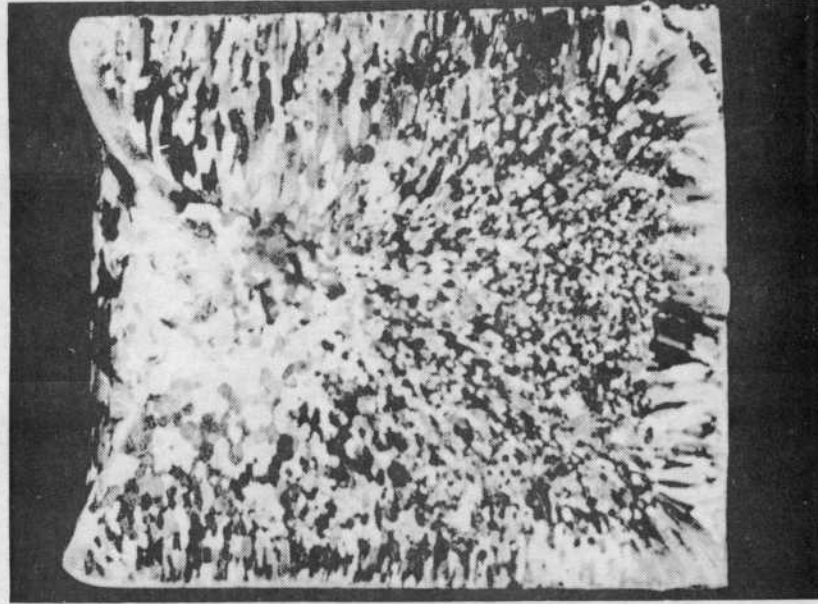


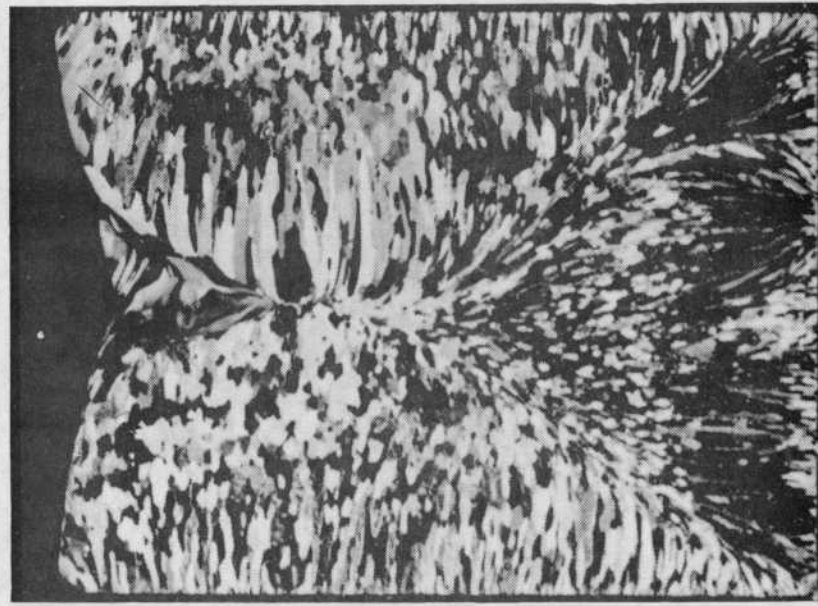
Fig. 2



c

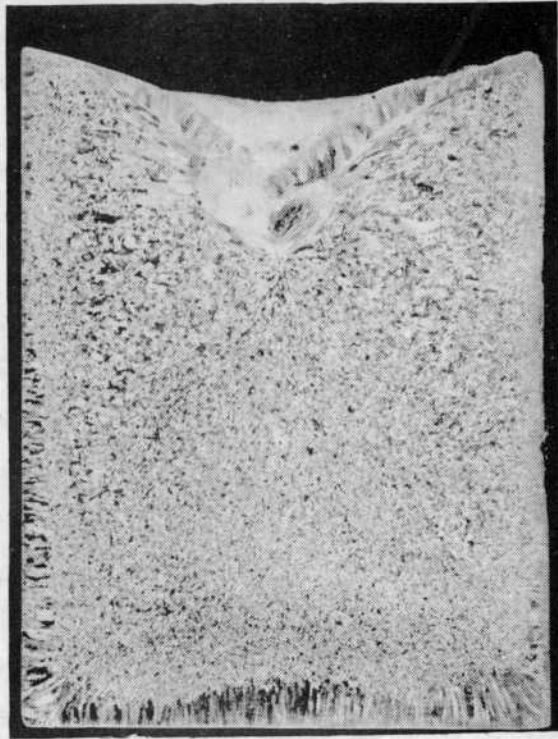


b

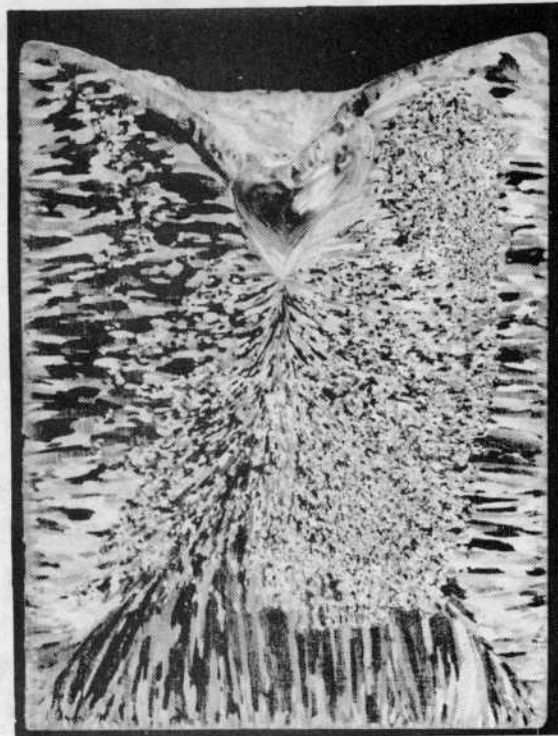


a

Fig. 3

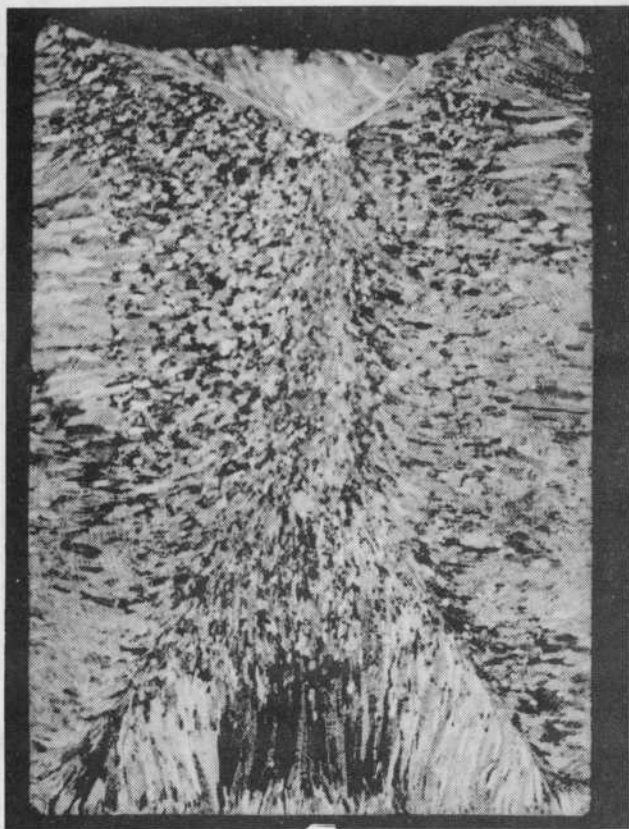


a

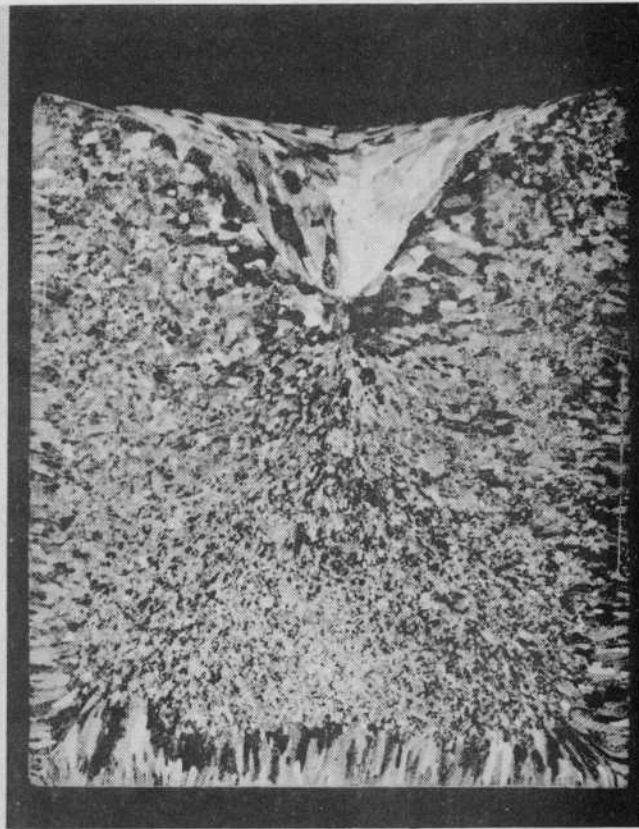


b

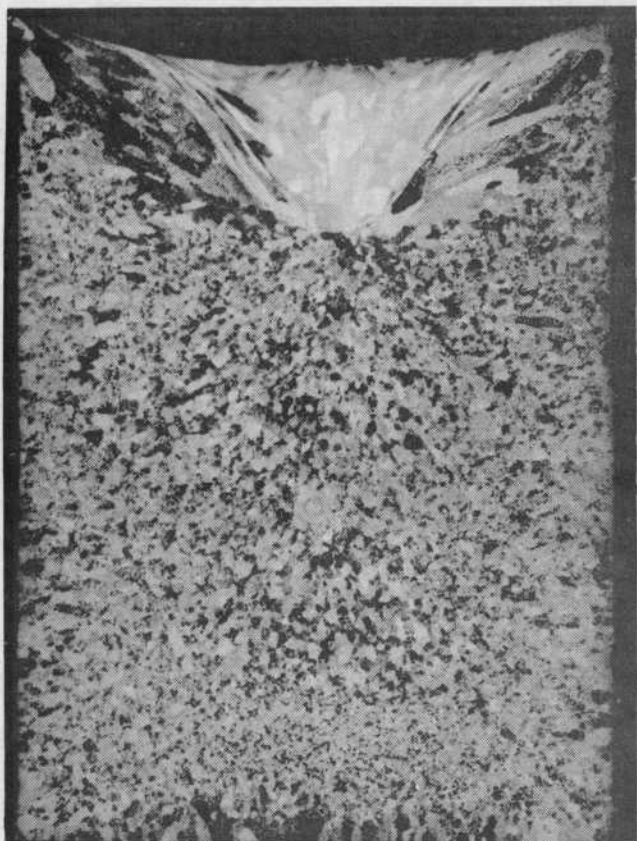
Fig. 4



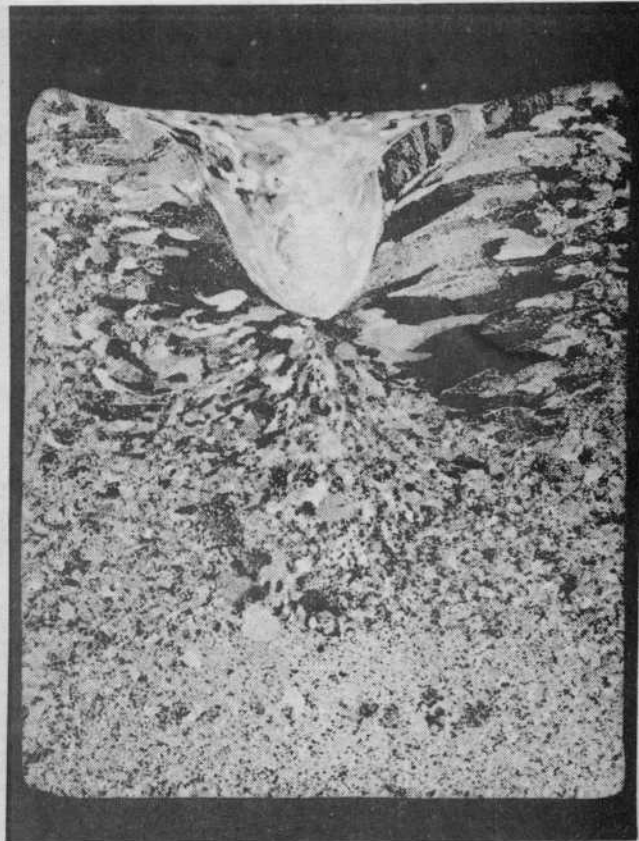
a



b

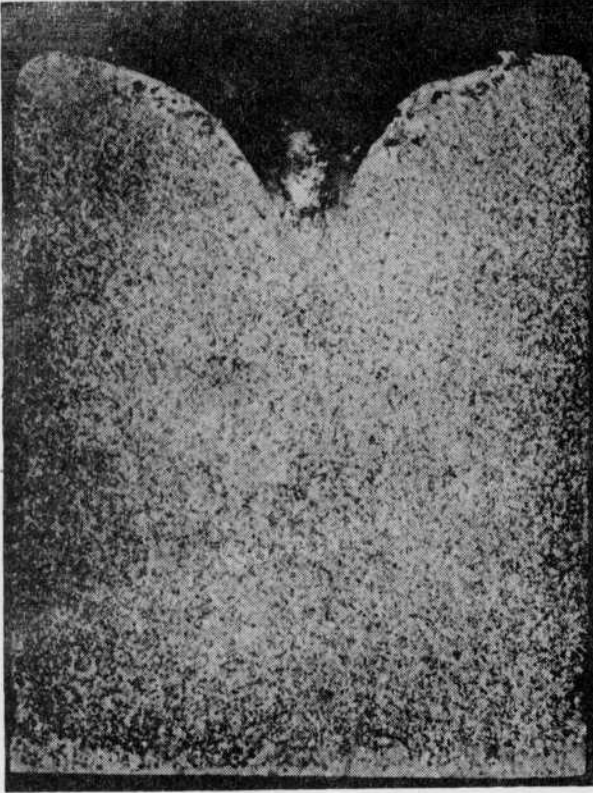


c

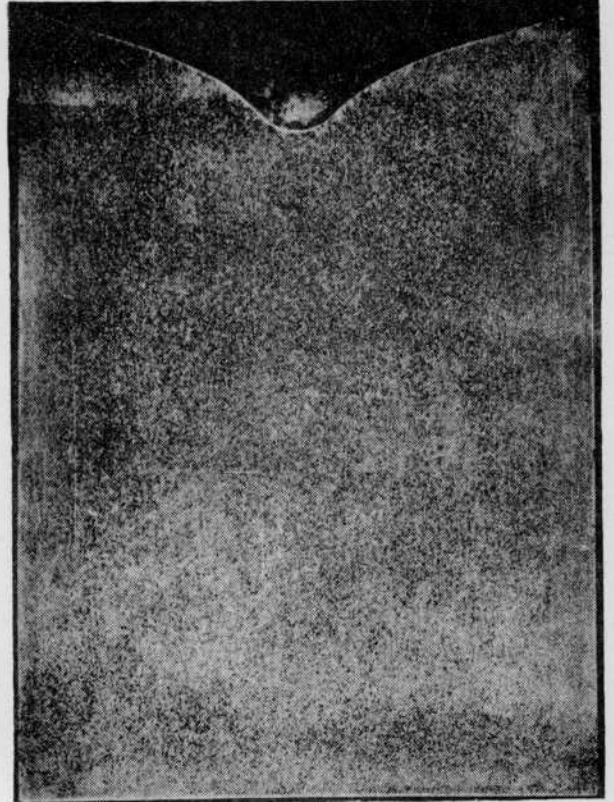


d

Fig. 5



a

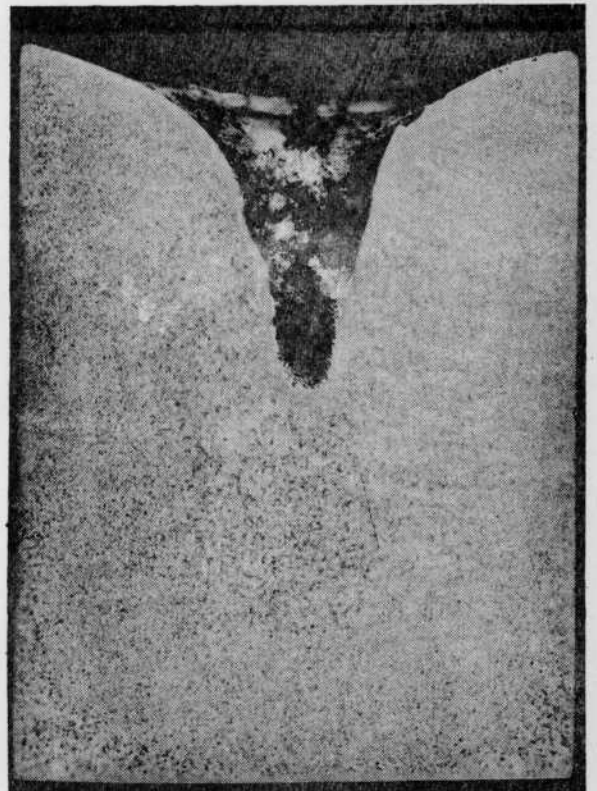


b

Fig. 6

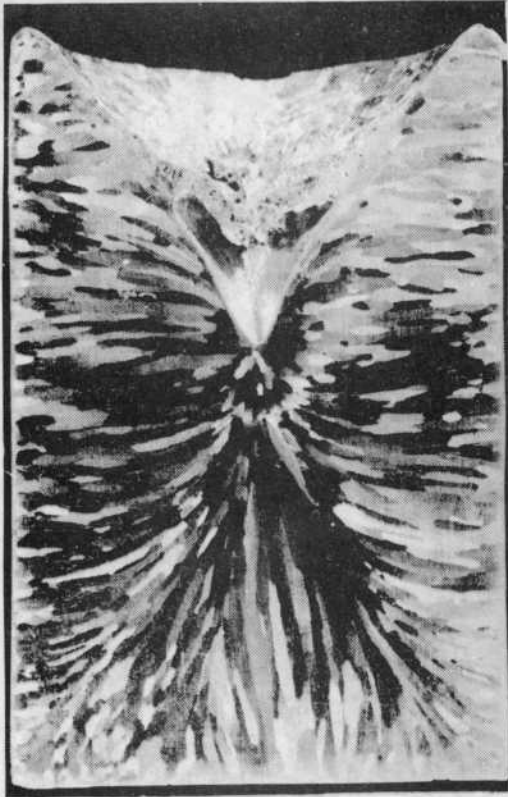


a



b

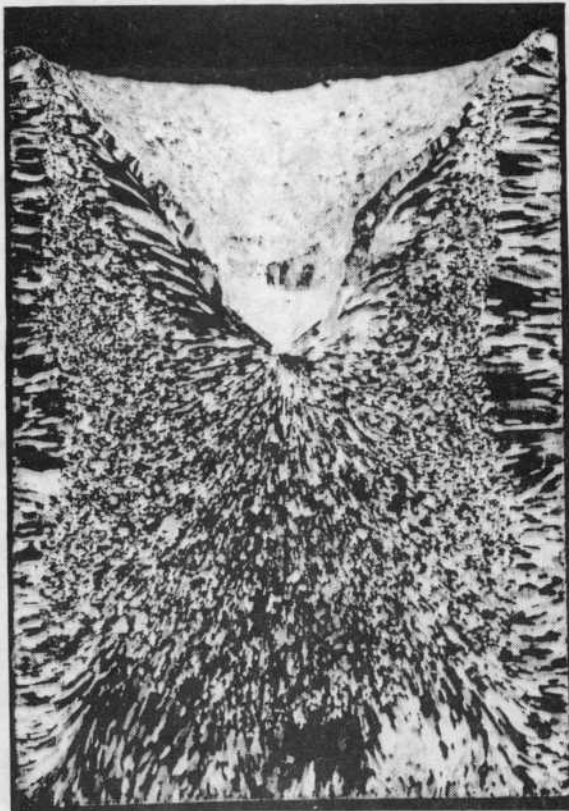
Fig. 7



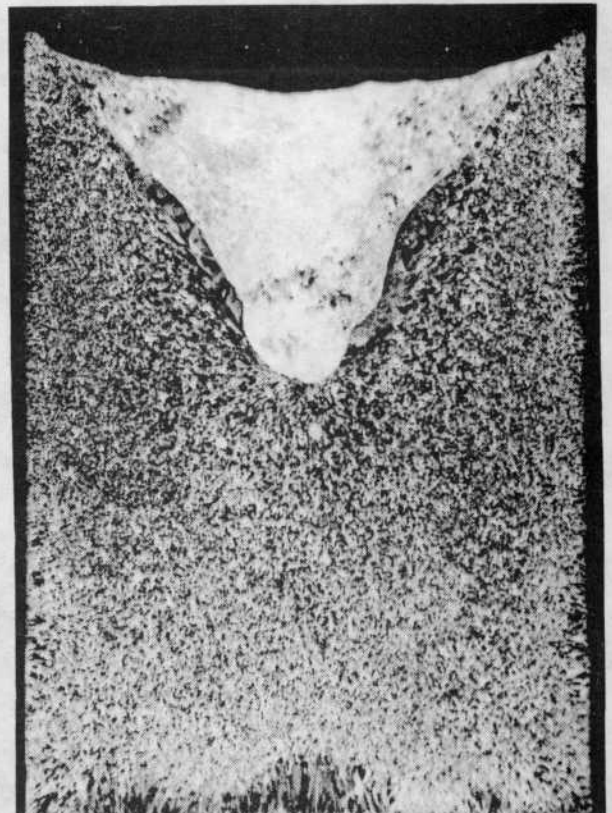
a



b

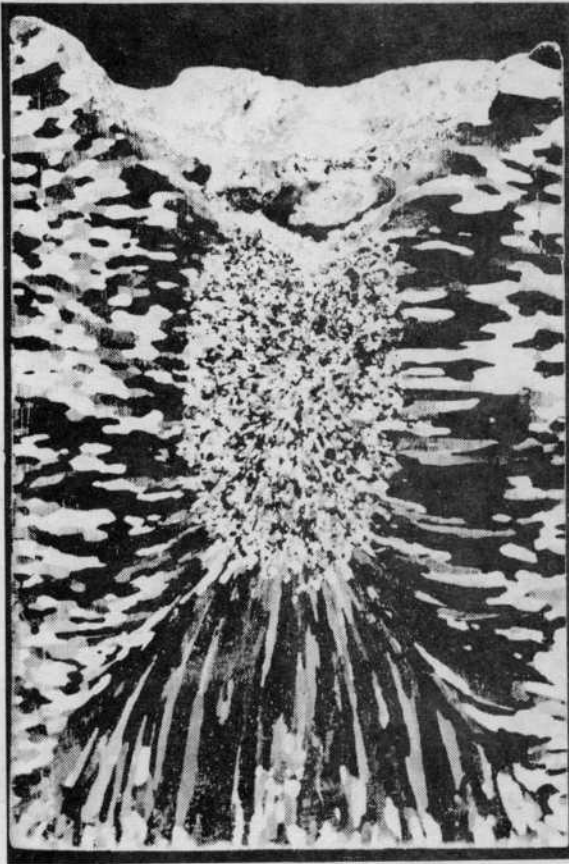


c

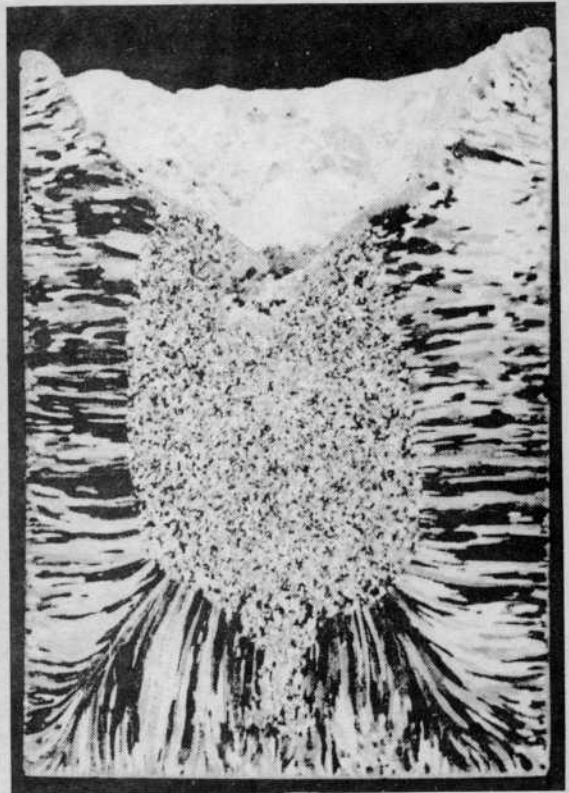


d

Fig. 8



a



b

Fig. 9

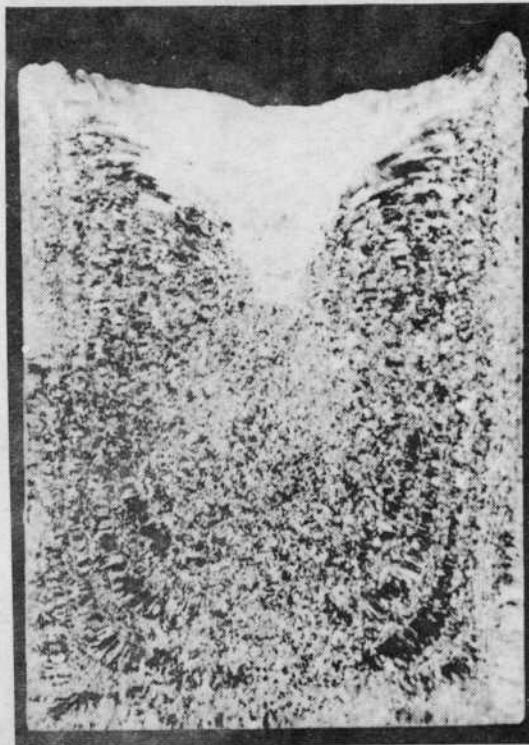


Fig. 10