

COMPETITIVIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE LOS MÉTODOS DE MICRO Y VIBRO FUNDIDO.

COMPETITIVENESS AND SUSTAINABILITY OF MICRO AND VIBRO CAST METHODS.

Ing. Manuel Felipe Rodríguez Guillén¹, Dr. C. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo², Dr. C. Roberto Pérez Rodríguez³, Juan José Cruz Serrano⁴

1 2 3 4 Universidad de Holguín. Centro de Estudios CAD CAM. Cuba. mfrguillen@uho.edu.cu¹, rigo@uho.edu.cu², roberto.perez@uho.edu.cu³; juanjose.cruzerrano@gmail.com⁴

RESUMEN

Las construcciones nano y microtecnológicas ocupan en la actualidad un lugar preponderante en el desarrollo del entorno tecnológico en todas las esferas del avance científico, esto ha propiciado una amplia demanda de microartículos y micropiezas, entre los cuales se destacan los microfundidos. Aunque a nivel mundial existe una gran cantidad de expertos y científicos desarrollando los procesos de obtención de piezas por microfundición no se ha logrado establecer una línea de producción estable debido a la presencia del defecto conocido como llenado parcial, provocado por el pequeño intervalo entre el vertido y el mecanismo de solidificación. Esta investigación denomina coquilla fusora al uso de un método de micro obtención de piezas combinando los procesos de fusión y vertido en un solo agregado de producción, donde al mismo tiempo que se produce el derretido el caldo metálico ocupa todas las cavidades del micromolde con el uso del método vibratorio, que acelera las propiedades de fundición, lo que permite que en el momento de la fusión de la carga metálica y el fundente las escorias, sustancias no metálicas y gases resultantes de estas reacciones termoquímicas suban o se mantengan en la parte fusora de la coquilla, garantizando una micropieza libre de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas con la composición química y las propiedades mecánicas acorde al régimen de trabajo de una manera competitiva, sostenible y sustentable.

PALABRAS CLAVE: fundición, microfundido, coquilla fusora, método vibratorio, vibrofundido.

ABSTRACT

Write The nano and microtechnological constructions currently occupy a preponderant place in the development of the technological environment in all spheres of scientific advancement, this has led to a large demand for microarticles and micropieces, among which the microfundids stand out. Although worldwide there is a large number of experts and scientists developing the processes of obtaining pieces by microfunding has not been able to establish a stable production line due to the presence of the defect known as partial filling, caused by the small gap between the spill and the solidification mechanism. This investigation denominates shell fusora to the use of a method of micro obtaining pieces combining the processes of fusion and pouring in a single aggregate of production, where at the same time that the melted metal is produced, it occupies all the cavities of the micromolde with the use of the vibratory method, which accelerates the properties of cast iron, which allows that at the time of the fusion of the metallic charge and the flux the slags, non-metallic substances and gases resulting from these thermochemical reactions rise or remain in the fusing part of the shell, guaranteeing a micropieza free of pores, blowholes and non-metallic inclusions with the chemical composition and the mechanical properties according to the work regime in a competitive and sustainable manner..

KEY WORDS: foundry, microfoundry, fusing mold, vibratory method, vibrofused

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y estado actual de la obtención de micropiezas con los métodos de microfundido y vibrofundido

Las construcciones nano y microtecnológicas ocupan en la actualidad un lugar preponderante en el desarrollo del entorno tecnológico en todas las esferas del avance científico, esto ha propiciado una amplia demanda de microartículos y micropiezas. La miniaturización de dispositivos y productos está siendo utilizada en casi todas las esferas de la vida desde la cocina doméstica hasta la tecnología espacial porque ahorra material, electricidad, espacio de trabajo y dinero. Este proceso se le aplica a disímiles líneas de producción y productos de variados tamaños. La manufactura de dispositivos miniaturizados para la ingeniería mecánica se tiene como un fin anhelado. En estos últimos años, la investigación en micro y nanotecnología ha atraído mucha atención en el campo de la manufactura avanzada (Ren et al., 2014). La tendencia de miniaturizar propició que naciera un paradigma nuevo nombrado

micromanufactura (Jain, 2014). Dentro de este se encuentran el micromaquinado, la microsoldadura, el microdoleado, la microfundición, etc.

La microfundición como nueva técnica para la producción de micropartes fue establecida a mediados de la década del 90. El término micro representa que las piezas obtenidas constituyen estructuras pequeñas o presentan detalles con un tamaño entre algunos micrómetros y cientos de micrómetros. Dicho término conserva también su validez para mayores partes con dimensiones exteriores de varios milímetros si contienen detalles en un rango micrométrico (Baumeister et al., 2011).

Tradicionalmente, dos técnicas diferentes para producir estructuras en un con dimensiones en un rango micrómetro son las utilizadas: la microfundición mediante la acción capilar y la basada en la fundición de precisión (Baumeister et al., 2005).

El primer método de manufactura fue desarrollado por Bach et al. (2001) y Moehwald et al. (1999). Ellos aplicaron la microfundición por acción capilar para rellenar los moldes de estructuras en el rango de algunos micrómetros. Similar a la fundición a presión, este procedimiento usa un molde permanente que puede ser abierto en pos de remover la estructura fundida. A las cavidades en el molde se les da forma con esmerilado de alta precisión. Para fundir, existen dos principios diferentes para llenar los: el de succión y el de desplazamiento. En el primer caso, la colada es succionada dentro de un molde especialmente revestido por la presión capilar. En el segundo caso la aleación penetra en el molde divisible y rellena las cavidades debido a la fuerza capilar. Subsecuentemente se le aplica presión al molde en aras de desplazar el exceso de mezcla metálica a través de una abertura. A causa de la absorción del revestimiento, el fundido se separa de la superficie del molde, pero al mismo tiempo cambia ligeramente la composición química de la aleación. En este modo de microfundición las geometrías obtenibles se ven limitadas a estructuras que pueden ser llenadas por la aplicación de fuerzas capilares.

Baumeister et al. (2005) afirman que el proceso de la microfundición de precisión mismo se basa en la técnica del molde perdido, cera perdida, comparable con la fundición de joyería o prótesis dentales. En contraste a los patrones de cera usados en la cera perdida, la microtecnológica en su mayor parte trabaja con patrones plásticos moldeados por inyección que poseen una resistencia mecánica superior. Las propiedades mecánicas mejoradas permiten un manejo y ensamble del patrón más cómodo durante el proceso de fabricación. La conformación de las microcavidades en el interior del molde, puede ser lograda por varios métodos. Baumeister et al. (2005) plantean que se aplica principalmente el microfresado. El proceso requiere que un patrón de plástico perdido se ensamble en una entrada por donde posteriormente se verterá el metal fundido y además necesita de un sistema alimentador de cera. El ensamblaje se encuentra entonces completamente incrustado en un molde cerámico. Después de secarse, la cerámica se sinteriza, lo que proporciona la existencia un molde cerámico con alta resistencia mecánica. Simultáneamente, el plástico se derrite durante el proceso de quemado. Para llenar el molde con el caldo metálico, comentan Baumeister et al. (2005) que puede utilizarse la presión de vacío o la técnica centrífuga.

En el primer caso, el molde inversor cerámico es evacuado, luego el caldo se vierte en el molde, llenándose las cavidades por la acción de la fuerza de gravedad. Posteriormente a esto, se le aplica presión a la colada mediante las máquinas de presión de vacío para fundición, las cuales trabajan típicamente a presiones en el intervalo de 3,5 bar a 4,5 bar, valores suficientes para el llenado de partes con dimensiones en un rango milimétrico. Dependiendo de la geometría especial de las micropartes y el sistema de alimentación, estos valores de presión aún pueden ser adecuados para la fundición de estructuras en el rango micrométrico. Sin embargo, si van a ser fundidas piezas con alta relación de aspecto, es menester aplicar una presión superior. Cálculos del comportamiento de llenado (Baumeister et al., 2002) muestran que la presión necesaria para que el caldo se introduzca en pequeños agujeros finos incrementa hiperbólicamente con el decrecimiento de los radios. Contradiendo varias tendencias reales en el procedimiento de fundición, Baumeister et al. (2002) afirman que para fibras con un diámetro de 1 micrómetro una presión de 20 bar es la imperiosa para vencer a las fuerzas capilares negativas que entorpecen la entrada del caldo metálico a pequeños agujeros. Considerando las condiciones reales de fundición, los experimentos (Baumeister et al., 2005) demostraron que, para partes con proporciones dimensionales altas, la presión alta trae consigo beneficios aún para piezas con un diámetro de 100 micrómetros. Sin embargo, cuesta mucho proveer una presión significativamente superior a 4 bar porque la presión debe aplicarse a la colada en un intervalo de tiempo cortísimo, donde los rangos de tiempo oscilan de a 0,001 s para 1 s. Por tanto, se requiere de un tanque presurizado con una válvula grande para conseguir un incremento inmediato de presión. Por otra parte, una presión alta no es siempre bienvenida porque con un aumento de presión se acrecienta la rugosidad superficial. Por consiguiente, se requeriría una superficie del molde idealmente plana, sin poros, lo cual, no obstante, impide que el aire residual salga del molde durante el proceso de llenado.

Baumeister et al. (2005) prosiguen afirmando que, en el segundo caso, la fuerza centrífuga sirve para lograr un correcto llenado del molde. En esta el molde gira y caldo metálico llena el molde por acción de las fuerzas centrífugas. El molde se coloca fijo horizontalmente o casi horizontalmente a un extremo del brazo centrífugo. En el otro lado, se

fija un contrapeso para mantener el balance del sistema de rotación. En la mayoría de las máquinas de fundición centrífugas el metal derretido se vierte primero en el sistema guía y luego el sistema inicia comienza a girar, pero también existen algunas máquinas donde el metal se derrama sobre el sistema en movimiento. Aquí las fuerzas centrífugas son superiores porque la máquina gira ya a toda velocidad y no se tiene en cuenta más ninguna aceleración ulterior. Cuando culmina el proceso de vertido, el crisol es inclinado y el caldo se comienza a verter en un llamado molde de caída localizado exactamente en la mitad del sistema rotativo. De aquí el flujo de derretimiento es dirigido hacia el molde rotativo y llena el molde a causa de las fuerzas centrífugas. La velocidad giratoria de máquinas centrífugas de fundición está en el rango 350 r/min a 3000 r/min (http://www.selec-inc.com/eng/eng_castmachine01.html). Observan Baumeister et al. (2005) que las máquinas modernas de fundición centrífuga proveen una presión superior para el llenado de moldes en comparación con las máquinas de fundición de presión de vacío, lo cual es provechoso para la manufactura de estructuras muy pequeñas. Después de la solidificación, la cobertura se remueve mecánicamente sin destruir la superficie fundida. Dependiendo de la aleación a fundir y el material del revestimiento, procesos químicos de limpieza adicionales pueden algunas veces deben ser obligatorios. Finalmente, cada parte se separa del sistema. A diferencia de la fundición de joyería o la dental, no existen tratamientos posteriores como el esmerilado o el pulido de la superficie del producto obtenido. Esto es debido a la geometría muy pequeña e inaccesible de los detalles de las micropartes fundidas y, además, por la necesidad de que exista una precisión alta del contorno sin ningún redondeo de los bordes.

Ren et al. (2014) realizaron una simulación física similar del microflujo en los microcanales durante el proceso de fundición centrífuga. Hallaron que el canal de flujo con la máximo área de sección transversal fue el que primero se llenó, y los de 0,1 mm de diámetro lograban llenarse cuando la velocidad giratoria se incrementó a 964 r/min. Comentan además que el tiempo requerido para lograr la tasa pico de llenado disminuye dramáticamente con el incremento de la velocidad rotacional.

Yang, Xu & Qi (2015) produjeron piezas de tamaño micrométrico mediante la fundición centrífuga utilizando el molde permanente, asumiendo la influencia de la velocidad centrífuga y el estado del llenado de los microcanales. Investigaron experimentalmente como ocurre el llenado del metal líquido en microcanales cuando actúa la rotación centrífuga. Diseñaron fabricaron y montaron la configuración para los experimentos de microfundición y de visualización de flujo. Las muestras de ensayo de tracción fueron fabricadas con una longitud de 4 mm y una sección transversal de 300 μm \times 500 μm , a una temperatura del molde de 270 $^{\circ}\text{C}$ y una velocidad centrífuga de 3300 r/min. Este estudio demostró que una alta velocidad centrífuga propicia el desarrollo del tamaño de grano. El tamaño de grano aumenta al acrecentarse la velocidad centrífuga: 8,91 μm para 3300 r/min, 6,79 μm para 3000 r/min y 5,05 μm para 2700 r/min. Los efectos de la fuerza de Coriolis se observaron a través de los experimentos de visualización de flujo, en particular, cuando existe una alta velocidad centrífuga. A medida que aumenta la velocidad centrífuga, los ángulos entre los microcanales y el flujo de líquido dentro de la zona de derrame aumentan y el flujo líquido es empujado hacia la pared lateral. Obtuvieron los instantes de tiempo para los que la velocidad de flujo alcanza el máximo decrecimiento con el incremento de la velocidad centrífuga: 0,357 s para 1796 r/min, 0,17 s para 1995 r/min y 0,125 s para 2195 r/min. Los microcanales de 100 μm \times 100 μm se llenaron de líquido cuando la velocidad de flujo no llegaba al máximo. Debido a la fuerza de Coriolis, los microcanales se llenan gradualmente desde el extremo lejano hasta su entrada en presencia de altas velocidades de rotación. Este estado de flujo da como resultado el desarrollo del tamaño de grano a la velocidad centrífuga más alta.

Rodrigues et al. (2018) proponen el diseño y fabricación de un reservorio de paredes delgadas mediante la microfundición asistido por vacío para un sistema de plasma de argón neutro (NAP por sus siglas en inglés) parte de un dispositivo médico de mínimo acceso (MIMD por sus siglas en inglés). El sistema NAP se compone de un gas inerte comprimido (argón), dos electrodos, y una fuente de alto voltaje para ionizar el argón, por tanto, es necesaria la miniaturización de un depósito de argón.

Estos investigadores crearon múltiples modelos de ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) y se ensamblaron en una columna de PLA llamada árbol, que aumenta la tasa de producción. El molde cerámico se produjo de acuerdo a un método convencional. En este proceso, los moldes cerámicos se sometieron a un ciclo de calentamiento en un horno para reducir el contenido de agua y aumentar la resistencia mecánica. El PLA insertado en la moldura. Después de estos pasos, la temperatura se redujo a la temperatura del molde de fundición (400 $^{\circ}\text{C}$), luego eliminaron el modelo intermedio de la moldura, permitiendo la creación de una forma vacía correspondiente al modelo final destinado a la producción. Se utilizó un horno de fusión por inducción equipado con un crisol de SiC con una capacidad de Al de 20 g. La aleación Al7SiMg (15 g) con 0,3 % de Al10Sr (modificador) y 0,2 % de Al5Ti1B (refinador) se fundió y se mantuvo dentro del crisol a 720 $^{\circ}\text{C}$ por 1 minuto para lograr homogeneización. Se añadió refinador de grano para mejorar las propiedades mecánicas y la fluidez. Durante el proceso de fusión se utilizó atmósfera de argón para prevenir reacciones entre el fundido y el ambiente. Después del tratamiento de fusión, las muestras se vertieron con una presión de vacío de 1,0 bar. Después de 10 min de enfriamiento, se retiró del molde y se limpió la pieza fundida para eliminar partículas cerámicas. La parte final de la microfundición asistida por vacío se finalizó, produciendo el depósito de argón de aluminio deseado. Demostraron este método puede ser usado para la fabricación de depósitos

pequeños de paredes finas. El espesor del depósito fundido difiere del esperado del depósito (200 μm), esta diferencia surgió de la tolerancia usada en la impresión 3D de los moldes plásticos.

Se asistió del método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) para realizar un análisis estático considerando la presión y la temperatura para simular la deformación de los depósitos de argón fabricados con espesores de 0,2 mm, 0,4 mm y 0,6 mm. Una presión dentro del depósito de 7 atm (709,275 Pa) y una temperatura externa de 37 °C (la temperatura dentro del cuerpo humano) fueron considerados en este estudio. Los resultados numéricos muestran una deformación total de 108 micrómetros, tensión de 160 MPa, y un factor de seguridad de 1,8 para el depósito más delgado de argón, afirman que el componente no experimenta deformación permanente.

1.2 Antecedentes del uso de las vibraciones en el vertido de la fundición con grafito nodular esférico

El método de vertido vibratorio consiste en colocar los moldes sobre una plataforma vibratoria, en la que se ha instalado un vibrador, y realizar el vertido del caldo metálico manteniendo el régimen vibratorio hasta la solidificación total de la pieza [Smirnov, *et al.*, 2002a].

La idea primaria de los tratamientos con vibraciones del metal durante el endurecimiento de los lingotes en las siderúrgicas, fue propuesta por Chernov [Chernov, 1950] y luego, Campbell desarrolla un modelo físico-matemático incorporando la aplicación de vibraciones a la fundamentación teórica de la formación del fundido de Balandín [Campbell, 1981]. A pesar de las grandes ventajas en cuanto a la calidad que propician los tratamientos vibratorios, éstos no han sido propagados de manera universal.

Se reporta solamente un prestigioso grupo de científicos ucranianos encabezados por Smirnov [Smirnov, *et al.*, 1991; Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a; Smirnov, *et al.*, 1989], que han incursionado en este campo desde la Universidad Nacional de Donetsk con buenos resultados, que han sido aplicados en la industria metalúrgica y sideromecánica de esa región. Se destacan entre otras investigaciones, (a) las relacionadas con la producción de lingotes de acero de laminación de alta calidad obtenidos por tratamientos con vibraciones, (b) la producción de lingoteras para acero de laminación con mayor durabilidad logradas bajo las influencias vibratorias, (c) la aplicación de estos tratamientos a lingotes y fundidos de Al y sus aleaciones y de aleaciones base Cu. Todas con mucho éxito tecnológico en cuanto a la calidad física, menores rechupes y la disminución de los poros y sopladuras, con un gran mejoramiento de las propiedades químicas y mecánicas.

En el año 1988, en la Empresa Metalúrgica de Donetsk “Vladimir Ilich Lenin”, un colectivo de autores encabezado por Smirnov [Smirnov, *et al.*, 2002b] realizaron investigaciones para el aumento de la calidad de las piezas fundidas de bronce con la aplicación de tratamiento con vibraciones durante la fundición de los moldes, demostrando haber alcanzado los principales objetivos que fueron el aumento de la calidad y la disminución de los defectos de rechupes por contracción. Las mejores propiedades mecánicas y la densidad máxima del metal se obtuvieron con una prolongación del tratamiento con vibraciones de 0,4 a 0,7 del tiempo de duración del periodo de cristalización, en dependencia de la configuración y las dimensiones del fundido [Smirnov, *et al.*, 2002a].

En 1995 Smirnov y colaboradores investigaron la influencia de las vibraciones en la solidificación del lingote de acero de laminación [Efimov y Eldarhanov, 1995; Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a]. Utilizó un vibrador mecánico con giro excéntrico, conectado a un electromotor de corriente continua como УЛ-062 (potencia de 250 W). Tanto el molde como el vibrador fueron fijados a una plancha metálica y ésta a su vez montada sobre elementos elásticos de goma. El cambio de la frecuencia de la vibración se realizó en la banda de 1 Hz a 150 Hz por medio del transformador en el cambio de la tensión de alimentación al electromotor.

Con esta investigación se demostró que la aparición de la mezcla de la fase sólida y el número de los centros de cristalización dependen de los diferentes regímenes de vibración aplicados. El frente de solidificación se realiza hacia todas direcciones ocurriendo una solidificación volumétrica, cubriendo fielmente todas las dimensiones y formas geométricas de la lingotera con un gradiente de temperatura uniforme en todo el volumen del lingote [Efimov y Eldarhanov, 1995; Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a; Smirnov, *et al.*, 1989].

La mayoría de los investigadores coinciden en que el tratamiento vibratorio asegura el desmenuzamiento de la estructura fundida, cambia la forma y la profundidad de la penetración de los rechupes. Además, favorece el mejoramiento de las propiedades mecánicas (la dureza, el límite de la fluidez y la solidez, el alargamiento relativo, etc.), y favorece el aumento de la homogeneidad física y química [Efimov y Eldarjanov, 2004; Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a].

Según Matijasevic (citado en [Smirnov, *et al.*, 1991]), la aplicación de las vibraciones directamente al molde presenta un interés práctico, ya que resulta en este caso posible el tratamiento de varios lingotes al mismo tiempo. Además, la intensidad del tratamiento puede tener ciertas restricciones, que son vinculadas a la solidez del molde para fundidos y a la estabilidad de los moldes para lingotes en la plataforma vibrante. En la literatura no se define sobre las direcciones de la vibración (horizontal, vertical o reversible). Para la respuesta a esta pregunta es necesario el

desarrollo adicional de la teoría de las influencias de las vibraciones sobre objetos concretos y los tipos de defectos eliminados.

En 1999, Smirnov y Pilyushenko (citado en [Smirnov, *et al.*, 2002a]) retomaron el tema de la influencia de la acción de las vibraciones en la solidificación de los lingotes de acero para laminación y la eliminación de los defectos típicos para este tipo de fundido. Según se aprecia, los métodos de accionamiento dinámico provocan efectos multilaterales causantes del aumento cardinal de la calidad de los lingotes. Bolotinnski [Smirnov, *et al.*, 2002a] en el año 2004 realizó una investigación sobre la influencia de las vibraciones en la formación de los carburos en los aceros al carbono y fue generalizado para las fundiciones grises ordinarias por Ten en el 2009 [Ten, 2009] y Wen *et al.* [Wen-Qi, *et al.*, 2016] en 2016 para las fundiciones grises aleada con Cr.

En general todos estos experimentos demostraron que con regímenes de variación de la frecuencia y la amplitud de vibración se intensifica considerablemente el proceso de la formación de las partículas de la fase sólida en el fundido, y a expensas de la sedimentación de las partículas de la fase sólida en la parte del fondo del lingote, se aumenta visiblemente la velocidad del avance del frente de solidificación en la dirección vertical, reduciéndose la duración de la solidificación por término medio entre un 20 % y un 40 % [Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a].

En condiciones experimentales el tratamiento con vibraciones no influyó visiblemente en el avance del frente de solidificación en la dirección horizontal. El proceso de avance del frente de solidificación en el plano vertical depende muy estrechamente de los regímenes de vibración usados. Con un régimen de la frecuencia de 35 Hz y la amplitud que asegure el desarrollo de los procesos de ondas en la superficie del fundido, aumenta el avance del frente de solidificación en la dirección vertical y aumenta considerablemente la cantidad de las partículas de la fase sólida del fundido. La fuente básica de las partículas de la fase sólida es la que se forma en las superficies exteriores de la pieza que, al aplicarle las vibraciones, éstas se desintegran formando nuevos núcleos de cristalización [Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a].

En condiciones del taller de fundición de la fábrica metalúrgica de Donetsk [Smirnov, *et al.*, 1991], se realizaron experimentos aplicando tratamiento por vibraciones a moldes húmedos (en verde) de piezas de hierro con 16 kg de masa. Se vertieron moldes estáticos para ser comparados con los vertidos sobre una plancha base establecida sobre elementos elásticos y un vibrador mecánico ubicado directamente sobre la plancha. Las características de las vibraciones fueron controladas por medio del captador DN-5 piezoeléctrico, estudiando la influencia de la variación de la frecuencia de vibraciones en el comportamiento de la composición química, la densidad y la dureza por toda la altura de la pieza. Las pruebas de rotura al impacto se realizaron a modelos cilíndricos de diámetro de 40 mm, variando la frecuencia de vibración. En general, el análisis de los datos mostró que la frecuencia de vibración puede ejercer una influencia considerable en los índices cualitativos de las fundiciones.

En la presente investigación, se plantea como hipótesis que al aplicar diferentes frecuencias de vibración durante el vertido y solidificación en el proceso fundición por la modificación "In mold", se aumentará el rendimiento de la cantidad de aleación nodulizante tecnológicamente necesaria y se disminuirá apreciablemente el índice de rechazo de piezas, facilitando de esta forma su implementación industrial.

Según los datos analizados, los métodos vibratorios garantizan una mayor calidad de los lingotes y fundidos que el resto de los métodos. Para la elección del tipo de método de tratamiento es necesario considerar la influencia que ejerce el mismo en el producto deseado.

La colaboración científica concurrente entre Sánchez-Figuero y Pérez-Rodríguez de la Universidad de Holguín, de García-Domínguez de la Universidad de Camagüey, de Alexey Nikoláevich Smirnov de la Universidad Técnica Nacional de Donetsk y Efimov V.A., Eldarjanov A.S. y Ten E. del Campus Aceros y sus aleaciones de la Universidad Tecnológica de Moscú (Anexo 17), permitió conocer los reportes de investigaciones precedentes sobre solidificación de las aleaciones metálicas bajo influencias externas [Efimov y Eldarjanov, 2004; Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a].

Estos antecedentes sirvieron de valiosas referencias en el momento de planificar la presente investigación. El análisis de las frecuencias usadas por estos investigadores permitió desde un principio desechar las bajas frecuencias y las altas frecuencias. Se tuvo en cuenta también la forma de cálculo y los resultados obtenidos de masa de nodulizante necesaria.

1.3 Antecedentes tecnológicos en Cuba del uso de las vibraciones en el vertido de la fundición con grafito nodular esférico

Desde 1995, Sánchez-Figuero [Sánchez-Figuero, 2012b; Sánchez-Figuero, *et al.*, 2013a; Sánchez-Figuero, *et al.*, 2016b; Sánchez-Figuero, *et al.*, 2013b; Sánchez-Figuero y Quesada-Estrada, 2015; Sánchez-Figuero, *et al.*, 2015c; Sánchez-Figuero, *et al.*, 2013f; Sánchez-Figuero, *et al.*, 2013h] (autor de la presente investigación) aplicó el tratamiento con vibraciones en los bancos de coquillas de la Fábrica de Cafeteras de la EINPUD "Primero de

mayo" en la Provincia de Villa Clara. En la aplicación, se unió la estructura metálica de los bancos de coquillas del vaso inferior, vaso superior y la tapa de las cafeteras KUPRES al pedestal metálico del electromotor que energiza los cilindros neumáticos, para aprovechar las vibraciones que el mismo trasmite.

Se reguló la frecuencia de vibración a 40 Hz con cuatro calzos de material compuesto de goma e insertos metálicos en las bases de los bancos de coquillas, según el torque de los tornillos de anclaje. De esta manera se aplicó el método vibratorio, logrando aumentar el copiado de la cavidad interior del molde metálico, se disminuyó el espesor de las paredes de las cafeteras aumentando la estanqueidad, se disminuyó la norma de consumo de Al, ahorrando los portadores energéticos durante su explotación al permitir un calentamiento más rápido.

En 1998, Sánchez-Figueroa [Sánchez-Figueroa, 2009a; Sánchez-Figueroa, 2009b; Sánchez-Figueroa, 2012a; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2013h] utilizó el método vibratorio en la eliminación del rechupe en fundidos de bronce en la DIFAE en Planta Mecánica de Santa Clara "Fabric Aguilar Noriega", disminuyendo el consumo de chatarra de bronce, al ser menor el tamaño de las mazarotas. En la Empresa de Fundición de Acero e Hierro de Holguín, Sánchez-Figueroa [Sánchez-Figueroa, 2009a; Sánchez-Figueroa, 2009b; Sánchez-Figueroa, 2012a], estableció una tecnología del método vibratorio que permitió la eliminación de los poros y sopladuras de los fundidos de cuproaleaciones.

En el año 2010, Sánchez-Figueroa *et al.* establecieron una tecnología de obtención de fundición con grafito nodular esférico por el método vibratorio en la Empresa de Fundición de Acero Hierro de Holguín, conjuntamente con el Laboratorio Metalográfico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín [Sánchez-Figueroa, 2011a]. En la investigación se analizó la influencia de la frecuencia de vibración en la obtención de la fundición con grafito nodular esférico por el método de vertido vibratorio.

Los resultados de estos análisis marcaron la gran diferencia de las estructuras cristalográficas obtenidas por los métodos estáticos y vibratorios. Estos resultados obtenidos por Sánchez-Figueroa [Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2015a; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2015b; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2016c; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2013d; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2013e; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2013g], así como de los investigadores ucranianos [Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a], sirven de antecedentes y permitieron al autor definir las variables independientes y sus niveles para la investigación actual.

La revisión de patentes [Bernard, 1964; Brown-Boveri, 1964; Degois y Gouvenel, 1975; Electrophysikalische, 1969; Jiachen y Xuezhong, 2014; Jinde, *et al.*, 2013; Lester, 1961; Mannion, 1991; Ryntz y Thomas, 1972; Stig, 1996; Vada, *et al.*, 2014; Vasiliev, *et al.*, 1979; Xing, *et al.*, 2015; Yunqing, 2015; Zhang, 2010a; Zhang, 2010b] no arrojó resultados en cuanto a la aplicación de vibraciones durante el método de producción de fundiciones con grafito nodular esférico modificado "In mold". Se encontraron raras aplicaciones de vertido en fundiciones, salvo las referenciadas en este capítulo y en general, aplicados en la cazuela para lograr uniformidad en el caldo y mejor separación de las escorias, no desde el principio metalúrgico de la fundición en el molde (Anexo 13).

4. CONCLUSIONES

Del análisis bibliográfico realizado se concluye, que no existen tecnologías que usen el método vibratorio en la obtención de microfundidos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2016c] R.P. Sánchez-Figueroa, A. García-Domínguez, R. Pérez-Rodríguez, y I. Rodríguez-González "Influencia del vertido vibratorio en la matriz y dureza del hierro gris con grafito esferoidal," *Ingeniería Mecánica*, Vol. 19, No. 1, pp. 26-29, 2016c, Url: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>.
- [Sánchez-Figueroa, 2016] R.P. Sánchez-Figueroa, *Tecnología CAD/CAM para fundidos con grafito esferoidal*: Editorial Académica Española, 2016, Url: <https://www.eae-publishing.com/catalog/details/store/es/book/978-3-659-70316-4/tecnolog%C3%ADa-cad-cam-para-fundidos-con-grafito-esferoidal>.
- [Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2016d] R.P. Sánchez-Figueroa, A. García-Domínguez, y R. Pérez-Rodríguez, "Aumento de la competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad en la obtención de artículos metálicos por el método de vertido vibratorio," en *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Elche, Alicante, España, 2016d, Url: <http://dime.uhm.es>. 07/11/2016.
- [Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2017] R.P. Sánchez-Figueroa, R. Pérez-Rodríguez, A. García-Domínguez, A.M. Quesada-Estrada, y L. Dumitrescu, "Obtención de fundidos de aleaciones no ferrosas por el método vibratorio," en *VIII Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Hotel Atlántico Guardalavaca, Holguín, 26 al 28 de Abril, 2017, Url: <http://eventos.uho.edu.cu>.