

Tema A1 Materiales: Inyección de aluminio a alta presión

“Análisis del flujo de llenado en un núcleo tipo jaula de ardilla manufacturado por medio de inyección de aluminio a alta presión (550 Ton)”

Dr. Gerardo García Liñán, M.I. Enrique Alejandro Vázquez Hernández, Dr. Pedro de Jesús García Zugasti (*) , Ing. Juan Gabriel Sandoval Granja, Ing. Ramón Esquivel Rendón

Departamento de Ingeniería Mecánica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Av. Tecnológico S/N, Col. U.P.A. , S. de G.S., San Luis Potosí, C.P. 78437,

(*) Autor de Correspondencia: e-mail:pzugasti@hotmail.com

RESUMEN

En el presente artículo se analiza el flujo de aluminio inyectado a alta presión, 550 toneladas, en una máquina de inyección horizontal de cámara fría, cabe mencionar que actualmente se manufactura a 50 toneladas, en una máquina de inyección vertical, esto a partir de la hipótesis que la presión de inyección y dirección de inyección contribuyen a la generación de turbulencias internas en el molde ocasionando defectos de porosidad. Se evalúa la porosidad a través de procesos destructivos. La metodología consiste en la investigación del estado del arte, conceptualización de los defectos, modelación de la pieza y el molde, la manufactura del molde y puesta en marcha, así como la evaluación de los resultados y la conclusión.

Palabras Clave: Inyección de aluminio, porosidad.

ABSTRACT

In this article we will analyze the flow of aluminum injected at high pressure, 550 tons, in a cold chamber horizontal injection machine, it is worth mentioning that it is currently manufactured at 50 tons, in a vertical injection machine, this from the hypothesis that the injection pressure and direction of injection contribute to the generation of internal turbulence in the mold caused porosity defects, the porosity will be evaluated through destructive processes, to evaluate the final conditions in which this material will be obtained after of the proposed changes. The methodology will consist of investigation of the state of the art, defects, modeling of the piece and the mold, the manufacture of the mold and putting underway, as well as the evaluation of the results and the conclusion.

Keywords: Aluminum injection manufacturing process, porosity.

1. Introducción

Un motor eléctrico rotativo se compone de dos partes, una parte fija que se denomina estator y que tiene forma cilíndrica, en cuya cavidad se coloca el rotor, que, como su nombre lo indica es la parte giratoria de la máquina, ambos se aprecian en la figura 1. El rotor se monta en un eje que descansa en dos rodamientos o cojinetes. [1]

El rotor o parte giratoria de los motores de inducción está constituido por un circuito eléctrico cerrado, su fabricación consta de un paquete de laminaciones de forma cilíndrica, sobre cuya periferia se dispone de conductores conectados entre sí por dos anillos. [2]

En la actualidad, la gran mayoría de los motores de inducción se fabrican del tipo rotor jaula de ardilla y la práctica común, en estos casos, es usar devanados de aluminio fundidos. Las laminaciones del rotor ensambladas

se colocan en un molde, donde se vacía el aluminio a alta presión, de manera tal que se formen las barras y anillos de corto circuito, así como las extensiones de ventilación, este proceso se conoce como de rotor fundido y es muy popular, debido a que el devanado queda de una sola pieza y no habiendo juntas o uniones, no hay posibilidad de resistencias altas por contacto. [2]

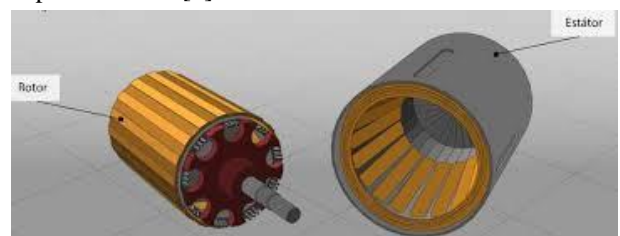


Figura 1. Rotor y estator de un motor jaula de ardilla

Las propiedades que favorecen la selección del aluminio (Al) y sus aleaciones son su alta relación de resistencia-peso, resistencia a la corrosión de muchos productos químicos,

alta conductividad térmica y eléctrica, atoxicidad, reflectividad, apariencia y formalidad y maquinabilidad; además, son no magnéticos. [3]

El proceso de fundición a presión en matriz fue desarrollado a principios de 1900, los costos de los equipos, en particular el de las matrices, es alto, pero en general los costos de la mano de obra son bajos, es económico para grandes lotes de producción. Existen dos tipos básicos de máquinas de fundición a presión en matriz: a) de cámara caliente y b) de cámara fría. En el proceso de cámara fría, se vacía metal fundido dentro de la cámara de inyección. Esta cámara no se calienta, de ahí el término cámara fría. El metal se fuerza dentro de la cavidad de la matriz a presiones que generalmente van de 20 a 70 MPa (3 a 10 ksi), aunque pueden ser tan elevadas como 150 MPa (20 ksi). Las máquinas pueden ser horizontales o verticales, en cuyo caso la cámara de inyección es vertical. Normalmente, las aleaciones de alto punto de fusión de aluminio, magnesio y cobre se funden mediante este método. Las temperaturas de los metales fundidos inician en casi 600 °C (1150 °F) para el aluminio y aleaciones de magnesio, y para las aleaciones de base cobre y de base hierro. [3]

Las máquinas para fundición a presión en matriz se clasifican según la fuerza que pueden ejercer para mantener cerradas las matrices. Las capacidades de las máquinas disponibles comercialmente varían de casi 25 a 3000 toneladas. Las matrices para fundición a presión pueden ser de una cavidad, de cavidades múltiples, de cavidades de combinación o matrices unitarias. El diseño de las matrices incluye una inclinación favorable (ángulo de salida) para permitir la extracción de la fundición. Los bebederos y canales de alimentación se pueden retirar en forma manual o mediante troqueles en una prensa. Con frecuencia se aplican lubricantes (agentes de separación) como delgados recubrimientos sobre las superficies de las matrices; éstos suelen ser lubricantes a base de agua, con grafito u otros componentes en suspensión. La práctica de la fusión es un aspecto importante de las operaciones de fundición, ya que tiene un impacto directo en su calidad. Los hornos de crisol, que se han utilizado ampliamente a lo largo de la historia, se calientan con combustibles como los gases comerciales, gasóleo y combustible fósil, además de la electricidad. [3]

Los defectos más comunes que existen en el proceso de fundición a presión, se presentan tanto en el tipo de cámara fría como en el de cámara caliente, lo más importante es contar con la mayor cantidad de información respecto al defecto, es decir, una explicación breve del defecto, y toda la información relevante a cerca de las variables que pueden afectar el proceso de fundición a presión, como serían, parámetros de la máquina (programa de inyección), operador, cavidad en la cual se presenta el problema, frecuencia del defecto, hora a la cual se presentó, temperatura del molde, etc. Es importante conocer la mayor cantidad de información para poder encontrar la causa del problema, estos se dividen principalmente en defectos externo e internos.

Los defectos internos en los componentes fundidos a presión en matriz se describen a continuación [4]:

- A) **Porosidad por flujo, aire y contracción:** Es igual que los problemas de aire atrapado la diferencia es que aquí no salen a la superficie se quedan en la parte interna de la pieza como se muestra en la figura 2, las causas principales son una mala optimización de la pieza, paredes muy gruesas o zonas de acumulación de material, los podemos encontrar también en las últimas zonas de llenado, y se pueden controlar ajustando al curva de inyección, áreas de ataque, diseño del sistema de alimentación, adición de excedentes de material, salidas de aire. [4]

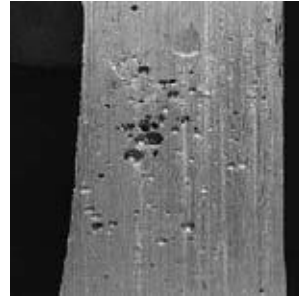


Figura 2. Poros por aire atrapado en el llenado

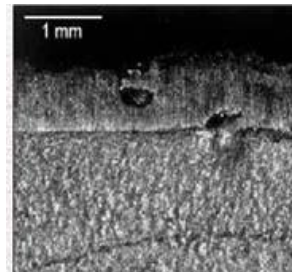


Figura 3. Poros por contracción

- B) **Inclusiones:** Principalmente se encuentran en la aleación, si la pieza es sometida a otros procesos de manufactura se pueden presentar problemas ya que regularmente estos materiales son muy duros y al maquinar alguna superficie pueden ocasionar la ruptura o daño de las herramientas, en la figura 4 se muestra una macrografía donde se encuentran inclusiones de otros materiales. [4]



Figura 4. Inclusiones

- C) **Formación de hojuelas:** Se deben a las solidificaciones prematuras de la superficie de contacto con la cavidad que se desplazan a la parte

interna de la pieza, los problemas más críticos se presentan en las propiedades mecánicas ya que no se tiene una unión adecuada en los granos en ciertas zonas como se muestra en la figura 5, se puede controlar monitoreando la zona en temperatura y adicionando o ajustando los excedentes de materiales y salidas de aire de estas secciones, así como también incrementar la temperatura de la aleación. [4]



Figura 5. Formación de hojuelas

- D) **Lagos interiores:** En algunos casos cuando los problemas de porosidad son muy críticos y hay secciones de concentración de material se forman grandes cráteres con ángulos agudos debidos a la contracción del material durante el proceso de solidificación como se muestra en la figura 6, es posible controlar estos problemas ajustando la curva de inyección, los sistemas de alimentación, optimizando la pieza o adicionando excedentes de material cerca de las zonas con problemas, así como también salidas de aire.[4]

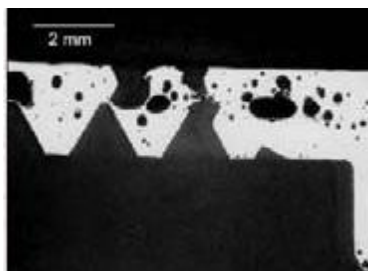


Figura 6. Lagos internos por contracción

En el presente trabajo se analiza el flujo de aluminio empleando 7 configuraciones dentro de un molde para fabricar rotores tipo jaula de ardilla, el cual es inyectado por una maquina horizontal tipo cámara fría con una capacidad de inyección de 550 toneladas, para conocer las condiciones que provocan la generación de porosidad interna y como reducirla con la mejora en el flujo de fluido al interior del molde. Para la evaluación de los resultados se emplearon pruebas destructivas y el calentamiento por inducción, maquinado por torneado, cortes y metalografía para la obtención y análisis de los especímenes de prueba.

2.1 Metodología

2.2 Materiales y equipo de prueba

Los materiales utilizados para la inyección de aluminio son lingotes de aluminio con 99% de pureza al ser un requerimiento del producto bajo el estándar DS/EN 576, un horno de fusión tipo crisol, una maquina de inyección horizontal de 550 Toneladas de presión de la marca “Farpress” y una cavidad de molde con la geometría requerida. Los equipos empleados para la evaluación de porosidad en pruebas destructivas son: a) un inductor térmico rotatorio con capacidad de $+1000^{\circ}\text{C}$, b) una máquina para el Torneado de piezas tipo CNC, c) una cortadora del tipo sierra cinta y un laboratorio para la obtención de las macrografías. La evaluación se hizo bajo el estándar BDG P202 Versión: septiembre 2010 [5].

2.2 Procedimiento

El método empleado para el análisis del flujo de llenado consistió en la inyección del aluminio usando un molde diseñado con referencia en las metodologías sugeridas en las siguientes publicaciones: 1. *Mold structure design and casting simulation of the high-pressure die casting for aluminum automotive clutch housing manufacturing* [6], 2. *Method for improvement of die-casting die: combination use of CAE and biomimetic laser process* [7], 3. *Prediction of gas entrapment defects during zinc alloy high-pressure die casting based on gas-liquid multiphase flow model* [8] y 4. *Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process* [9]

2.3 Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la prueba de temperatura por medio de un elemento de inducción, así como el valor de los parámetros temperatura y tiempo.

Tabla 1 Prueba térmica

Resultados de prueba de estrés a temperatura							
Longitud de pieza (mm)	60	75	90	110	125	140	180
Temperatura de inducción ($^{\circ}\text{C}$)	270	380	400	380	370	385	380
Tiempo de prueba de estrés (S)	26	29	37	29	29	39	29
Cantidad de piezas sujetas a estrés	50	50	50	300	100	100	100
Piezas Aprobadas	47	44	50	297	99	100	98
Porcentaje de rechazo	6%	14%	0%	1%	1%	0%	2%

En la figura 7 se puede apreciar la cantidad de piezas aprobadas respecto y las piezas sujetas a estrés.

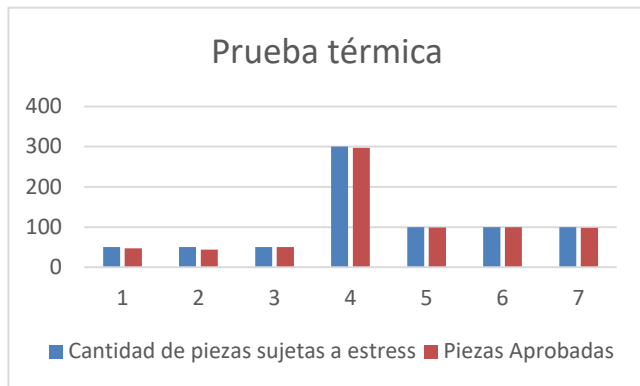


Figura 7. Detalle de prueba térmica

Durante la evaluación por medio del maquinados de los especímenes de prueba, se pudo observar el llenado de las piezas a diferentes diámetros, para asegurar que este fue uniforme y que las imperfecciones de las piezas son despreciables para su aplicación final, cabe mencionar que estas piezas fueron obtenidas del mismo periodo de fabricación que las piezas que fueron sometidas a estrés térmico.

Como se observa claramente en la figura 8, la pieza fue maquinada a 4 diámetros diferentes, uno de ellos fue 38mm, esto se hizo utilizando una máquina de control Numérico (CNC), las imperfecciones permitidas no deben exceder 3 mm, tomando como referencia un estudio de capacidad del proceso previamente realizado [8], durante las pruebas destructivas se encontraron todas las piezas dentro del tamaño de porosidad permitida, el 4% de toda la población fue maquinada, todas las mediciones de porosidad se realizaron con un vernier.



Figura 8. Pieza Maquinada

Como parte de la investigación, se hicieron cortes transversales como se muestra en la figura 9.

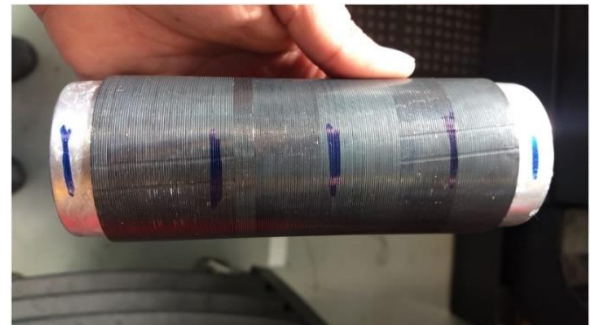


Figura 9. Preparación de pieza para corte transversal

Así mismo, como parte del desarrollo de la investigación, se hicieron cortes longitudinales como se muestran en la figura 10.



Figura 10. Preparación de pieza para corte longitudinal

Obteniéndose que las piezas estaban completamente llenas en la orientación transversal como se muestra en la figura 11.



Figura 11. Resultados de cortes transversales



Figura 12. Resultados de cortes longitudinales

Del mismo modo estaban completamente llenas en la orientación longitudinal como se muestra en la figura 12.

Las muestras fueron apropiadamente cortadas en tres secciones transversales: a) sección inferior (figura 13), b) sección intermedia (figura 14) y c) sección superior (figura 15), distribuidas uniformemente a lo largo del rotor, y cada sección se preparó para su análisis metalográfico con lijas y paños de pulido impregnados de pasta de diamante de 3 y 1 μm . Posterior a esto, se observaron en el microscopio electrónico de barrido con el fin de analizar la porosidad en cada sección.

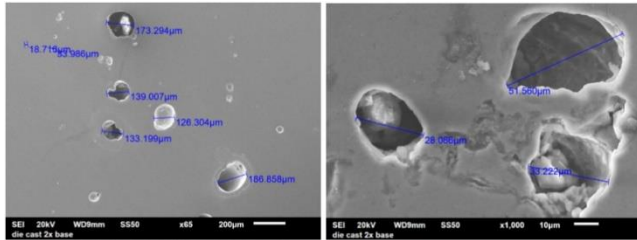


Figura 13. Macrografía en sección inferior

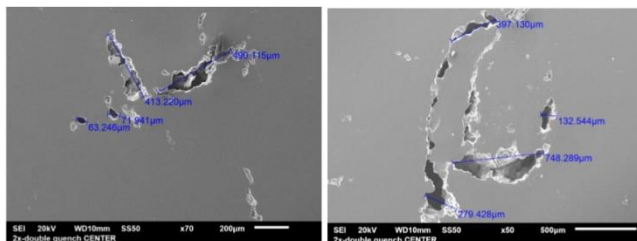


Figura 14. Macrografía en sección intermedia

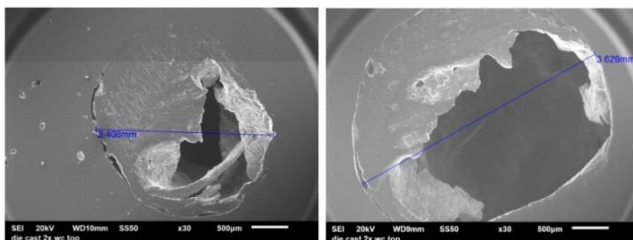


Figura 15. Macrografía en sección superior

Se hace evidente que en la sección inferior/superior se encontró macro-porosidad (por arriba de 1 mm) y microporosidad (por debajo de 1 mm), mientras que en el caso de la sección central se encontró principalmente microporosidad y escasa presencia de macro-poros.

Se observa que la forma de los poros de la sección central presenta una morfología de tipo ramificación, la cual según la literatura consultada está asociada a el fenómeno de contracción o cambio en volumen o en inglés “*shrinkage*”, el cual ocurre debido a la alta contracción que el aluminio tiene cuando pasa del estado líquido al sólido, y el cual puede llegar a ser del -8%. [10]

Por otro lado, en la sección inferior /superior se observó tanto macro como microporosidad, con formas esféricas de los poros, vale la pena resaltar que, en muchos de los poros en estas secciones, la forma más que esférica es de tipo cilíndrica, ya que éstos se extienden a una gran profundidad en la dirección vertical del rotor. Este tipo de porosidad encontrada en las bases y tapas corresponde a porosidad formada por causa del hidrogeno, el cual se introduce en el aluminio en su fase líquida, tanto en forma progresiva a través del tiempo (difusiva) como en forma súbita debido a la velocidad alta con la que el molde de inyección se llena con aluminio liquido (turbulencia). [10]

Como resultado de la discusión se propone la siguiente teoría: el gas aumenta su presión dentro del poro, y si el poro es lo suficientemente grande, puede ocasionar la deformación plástica del aluminio debido a los altos esfuerzos ejercidos en el metal, lo cual ya se ha observado en algunos casos. Mientras que algunos microporos se fracturan y se interconectan con otros y/o con la superficie de las bases y tapas, generando trayectorias abiertas para que el gas comience a escapar al ambiente. La velocidad con la que este gas pueda escapar depende mucho del tamaño de los microporos. Por esta razón, a veces no se nota tan rápido la fuga de gas, sino hasta dentro de un tiempo razonablemente largo.

4. Conclusiones

El proceso de inyección a alta presión es un proceso que mezcla diversas áreas de la ingeniería mecánica, desde del diseño, la manufactura, flujo de fluidos, equipos térmicos entre otros, por lo cual la manufactura de componentes es difícil de controlar requiriendo de un campo amplio de experiencia para eliminar o reducir los defectos que dan origen a los problemas de calidad.

Debido a la gran cantidad de variables involucradas en el proceso, es fundamental que estas se identifiquen claramente y cuantificarse mediante sistemas de monitoreo constante, y de esta manera se conozcan los rangos de operación que permitan establecer valores límites y parámetros importantes que inciden en la aparición de defectos de calidad.

Es importante que ambas partes cliente/proveedor definan al inicio de cada proyecto las especificaciones apropiadas que demandan los requerimientos del producto con el objeto de definir los criterios de aceptación y las fallas del proceso que pueden llegar o no a ser aceptables.

Agradecimientos

Se agradece al TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN LUIS POTOSÍ por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación, así como a las personas que brindaron asesoría durante esta investigación y que soportaron este proyecto.

REFERENCIAS

-
- [1] LIMUSA, Ed., *El ABC de las máquinas eléctricas*. Mexico, D.F: Harper, Enríquez, 2004.
 - [2] McGraw Hill, Ed., *Maquinas Electricas*, 5ta ed. Avaraca, Madrid, 2003.
 - [3] S. R. Schmid and S. Kalpakjian, *Manufactura, ingeniería y tecnologia*, Quinta Ed. Pearson, Prentice Hall, 2015.
 - [4] “Diseño de un molde de fundicion a presion,” Universidad Nacional Autonoma de México, 2008.
 - [5] B. Sheet, “Volume Deficits of Castings Made from Aluminium , Magnesium , and Zinc Casting Alloys BDG-Reference Sheet,” vol. D, no. September, pp. 1–24, 2010.
 - [6] S. Il Jeong, C. K. Jin, H. Y. Seo, J. D. Kim, and C. G. Kang, “Mold structure design and casting simulation of the high-pressure die casting for aluminum automotive clutch housing manufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 84, no. 5–8, pp. 1561–1572, 2016.
 - [7] L. Q. Chen, L. J. Liu, Z. X. Jia, J. Q. Li, Y. Q. Wang, and N. B. Hu, “Method for improvement of die-casting die: Combination use of CAE and biomimetic laser process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 9–12, pp. 2841–2848, 2013.
 - [8] L. Cao, D. Liao, F. Sun, T. Chen, Z. Teng, and Y. Tang, “Prediction of gas entrapment defects during zinc alloy high-pressure die casting based on gas-liquid multiphase flow model,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 1–4, pp. 807–815, 2018.
 - [9] M. W. Fu and M. S. Yong, “Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 18, pp. 5203–5216, 2009.
 - [10] Committee ASM International Handbook, “ASM Metals HandBook Volume 15 - Casting,” *Technology*, vol. 15, p. 3470, 2001.