

Título: Diseño de moldes y tecnología para la fabricación de engranajes plásticos de dientes rectos asimétricos para la industria azucarera.

**Autores: MSc. Ángel Rafael García Martínez*
Dr. Jorge Laureano Moya Rodríguez ***

Instituciones: * Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Cuba.

RESUMEN

En el presente trabajo se hace un análisis de los procesos de moldeo por inyección de los engranajes, mostrándose las ventajas con respecto al maquinado de los polímeros. Se brinda el procedimiento de cálculo de un molde para el diseño y fabricación de ruedas dentadas con dientes rectos asimétricos, así como los métodos de obtención del instrumental necesario que permite acabados de alta calidad en piezas fabricadas de materiales termoplásticos, utilizadas, entre otras, en la industria azucarera. Se usa una metodología de cálculo que incluye diferentes parámetros de un molde, tales como: número de cavidades, tiempo de enfriamiento, longitud de las vías de frío. Por otra parte se sugiere la configuración de los canales de alimentación y puntos de inyección entre otras. Finalmente se muestra el molde diseñado y fabricado para un caso particular destacando la validez del método usado. Se destaca en particular la asimetría en los perfiles logrados mediante la utilización del método de la electro erosión por hilo para fabricar la cavidad del molde.

PALABRAS CLAVES: moldes, engranajes asimétricos, electro-erosión.

Title: Mold design and technology for the production of plastic spur gears with asymmetric teeth for sugar industry.

Abstract:

An analysis of the injection molding process of plastic gears, showing its advantages regarding width machining process it is made in this paper. Calculation procedure for designing and molding of spur gears with asymmetric teeth is offer, including necessary tools for obtaining high quality surface finishing of gears made from thermoplastic materials generally used in sugar industry. The procedure includes different molding parameters such as number of cavities, cooling time, injection points, etc. Molded spur gears, tools, machines and molds are showed.

Key words: molds, gears, EDM

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una tendencia cada vez mayor de sustituir piezas metálicas por piezas de materiales poliméricos, y los engranajes no son una excepción. Dentro de la Industria azucarera hay infinidad de aplicaciones donde se pueden utilizar engranajes plásticos en lugar de engranajes metálicos, pudiendo señalarse a manera de ejemplo los engranajes de los cristalizadores, así como muchos otros engranajes secundarios que pueden estar sometidos a corrosión. Los engranajes plásticos son fabricados en la actualidad por varios procedimientos entre los que se encuentran los métodos tradicionales por arranque de virutas y el moldeo. [2, 3, 7, 9].

La inyección de plástico es una forma que adquiere cada vez más auge en la fabricación de estas transmisiones por las ventajas que reporta desde el punto de vista constructivo y de calidad de la pieza obtenida.

Profundas diferencias existen entre el engranaje moldeoado y los engranajes elaborados por arranque de virutas tanto en aceros como en plásticos, en el último método según el

investigador Roderick E. Kleiss [8, 9]. y Presidente del Instituto Kleiss Engineering la calidad de la superficie a elaborar depende del régimen de corte a que estará sometida pues se corre el riesgo de que la herramienta utilizada no copie exactamente el perfil deseado, influyendo negativamente en la vida de este. Ahora bien al analizar un engranaje moldeado se pueden señalar varias ventajas que van desde la calidad en la superficie obtenida hasta una buena concentricidad entre sus parámetros geométricos donde se logra además una alta precisión.

Las precisiones en los engranajes plásticos están estrechamente ligadas a los métodos de fabricación utilizados en el molde y en particular en el macho y en la cavidad. Al elaborar el macho y la cavidad del molde deben tenerse en cuenta regímenes tecnológicos que garanticen el acabado superficial óptimo en correspondencia con las características exigidas a la pieza plástica así como del material a moldear, además de facilitar el trabajo del molde en su conjunto [9,10, 11].

MÉTODO DE ELECTRO-EROSIÓN. PARTICULARIDADES

En la elaboración de los moldes es de vital importancia el empleo de la electro-erosión, proceso que garantiza adecuadamente que la pieza sea moldeada con las características geométricas que se requieren según los cálculos, este método es posible aplicarlo tanto a las cavidades como a los insertos porque precisamente estos son las partes que estarían en contacto con el material plástico a moldear.

De acuerdo con Kleiss [9] todos los engranajes plásticos son moldeados en cavidades elaboradas por electro-erosión. Esta tecnología permite y esta ligada a la utilización de métodos computarizados en los cuales el engranaje puede representarse perfectamente en un sistema CAD y transferirlo a la máquina electro-erosiva, copiando fielmente la forma deseada del perfil.

El diseñador es libre de crear el perfil matemático que quiera y transferirlo a la electro-erosiva de hilo o de penetración.

Ya en la máquina el programa se encargará de contornear la figura que se quiere por el sistema CAD. Con esta herramienta en la mano el diseñador puede obtener una evolvente con todas las condiciones de trabajo deseadas, el espesor del diente óptimo, ajustar el ángulo de presión. etc.

De forma general en los machos y las cavidades de los moldes para la obtención de engranajes plásticos es usado el método por EDM (Electrical Discharge Machining) [9]. Este método consiste en el principio de erosión de un material conductor de la electricidad a través de descargas eléctricas contra su superficie usando un alambre cargado eléctricamente que talla la cavidad dentro del acero. La generación por alambre EDM permite tallar cualquier cavidad en el acero, ya sea para fabricar un molde o una rueda metálica directamente (ver figura 1). En el caso particular de los engranajes se requiere de un conocimiento detallado de la exactitud del perfil de la involuta y de la trocoide del diente de la rueda y el diámetro de fondo. El método básico para la generación de cremalleras es superfluo para los engranajes plásticos y se convierte en mera invención matemática a través de la cual se describe este tipo de engranajes en un estilo similar al tallado primario. Este método permite un adelanto en el proceso de diseño pudiendo ser desarrollado con muchas variables y pueden ser integrados dentro de un proceso de CAD para la investigación de tolerancias, condiciones máximas y mínimas del material y parámetros funcionales del engranaje así como el radio de contacto y juego de contacto entre dientes. Esta aproximación no necesita de ningún tipo de definición de engranajes para construcción, este puede ser aplicado para especificaciones de engranajes no estándar y con cualquier perfil del diente.

Casi todos los engranajes rectos plásticos de hoy en día son moldeados a base de cavidades cortadas con alambre EDM. Kleiss y Hoftmanh [9] han escrito sobre este proceso, su aplicación y su exactitud. El alambre EDM puede trazar cualquier construcción en dos dimensiones para maquinar partes directamente desde el CAD. Por lo tanto cualquier geometría que pueda ser representada en CAD puede ser aplicada a la cavidad del molde.

La importancia de estas diferencias es primordial ya que los engranajes plásticos no dependen de las herramientas generadoras para crear su geometría. El diseñador es libre para crear engranajes perfectamente matemáticos en papel y transferir esa geometría a la rueda a través del alambre EDM.

La expansión o contracción de los plásticos debido a la humedad, temperatura, y ambientes químicos pueden ser modelada por un simple incremento o decremento de la geometría del engranaje a través del CAD. La cavidad del molde desarrollada también puede ser diseñada en esta forma.

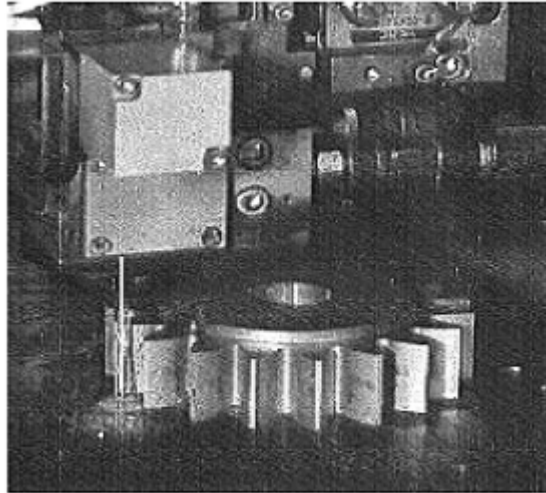


Figura 1. Proceso de electro-erosión de una rueda dentada.

La rueda individual puede ser dimensionada inversamente proporcional a la contracción esperada del material. Esto dará una primera y muy buena aproximación a la exactitud de la geometría de la rueda moldeada.

El método de obtención por alambre EDM de ruedas dentadas le permite al diseñador de engranajes la posibilidad de explotar el material en sus condiciones máximas. No hay confusiones, sólo se requiere de simple trigonometría y un conocimiento básico de la involuta y el círculo base.

Al realizar todos los dibujos en un sistema CAD, el diseñador aventajado podrá hacer físicamente una geometría aceptable de la rueda en pantalla. Esto servirá de mucho pues se puede ver la rueda dentada creada y la que ha sido moldeada.

La descripción de la cremallera se convierte en superflua. El círculo base es el principal parámetro por definición. La generación del ángulo de presión se convierte en una simple variable. Un tipo de engranaje puede ser diseñado para encajar en diferentes aplicaciones. Los engranajes pueden ser diseñados para tensiones mínimas o radios de contacto máximos o para el menor cúmulo de tolerancias para el mecanismo.

Los análisis tradicionales serán siempre importantes. La tensión en la involuta, el engranamiento y las inspecciones matemáticas no deberán ser diferentes en ejecución para este tipo de desarrollo que para los diseños tradicionales. La visualización será conveniente para el diseñador, pero mas importante es la factibilidad del diseño libre. La geometría del engranaje se convierte en una variable infinita en la construcción así como deberá ser para generar matemáticamente cavidades para engranajes plásticos. Las restricciones artificiales impuestas por la incorporación de cremalleras estándar son eliminadas.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PAREJA DE ENGRANAJES ASIMÉTRICOS:

Para demostrar la factibilidad de fabricación de los engranajes asimétricos, los autores teniendo en cuenta los aspectos planteados en los epígrafes precedentes diseñaron y fabricaron el molde para una pareja de engranajes asimétricos con módulo 4mm, ángulo de ataque de 20° y ángulo de respaldo de 25°. Para el diseño del artículo ha sido utilizado el

software gráfico de diseño Mechanical Desktop .7 Power Pack mediante la opción del Shaft Generator que permite la obtención de ruedas dentadas con todos sus parámetros constructivos.

Para concebir todo el herramental necesario que conformó todo el conjunto de partes del molde se tuvo en cuenta una metodología desarrollada por los propios autores y que será objeto de una publicación posterior donde aparecen todos los aspectos relacionados con el diseño y fabricación del molde y de los engranajes.

El material utilizado fue Poliamida 66 (Nylon).

Se debe señalar que el molde en su conjunto puede ser utilizado para diversas variantes de engranajes plásticos tanto simétricos como asimétricos con solo cambiar insertos y cavidades, pues los sistemas de enfriamiento, alimentación y extracción se ajustan perfectamente a esa intercambiabilidad que se propone.

Valores máximos límites de los artículos a obtener en el molde propuesto:

Diámetro exterior 100 mm.

Espesor: 15 mm.

DISEÑO DEL ARTÍCULO. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.

El artículo a moldear forma parte de la gama de engranajes que se presentan en las técnicas actuales de la industria mecánica, es además por sus características una nueva variante en cuanto a perfiles de engranamiento que se investigan a nivel mundial y que comienza a perfilarse como una realidad en que se pueden alcanzar resultados de relevancia considerables aplicados a los plásticos como material que se impone a escala global.

CÁLCULO Y DISEÑO DEL MOLDE DE INYECCIÓN.

Metodología a tener en cuenta para el cálculo: [1, 4, 5, 6]

1. Artículo plástico a fabricar. (Engranaje plástico asimétrico de perfil recto)

$$Z = 23$$

$$m = 4$$

Diámetro exterior: 100mm

Diámetro interior: 82.4mm

Ángulo de ataque #1: 20°

Ángulo de respaldo #2: 25°



Figura 2 Rueda plástica a moldear.

Para concebir todo el herramental necesario que conformará todo el conjunto de partes del molde se ha tenido en cuenta una metodología que confirma la efectividad de esta con márgenes de seguridad hasta un 30% en el cálculo de capacidad de inyección.

2. Molde a utilizar. El molde a utilizar se puede clasificar como un molde de extracción por pines dentro de la gama de moldes que pueden ser usados.

3. Material del artículo: Poliamida 66 (Nylon).

%C 1 – 2.5 Peso específico: 1.13 – 1.15 g/cm³. Peso del artículo: 64 g

4. Clasificación del artículo: Pequeño y simple.

5. Tipo de entrada en la cavidad.

La entrada a colocar será lateral en forma de diafragma para garantizar el llenado rápido de la cavidad. (Fig. 3).

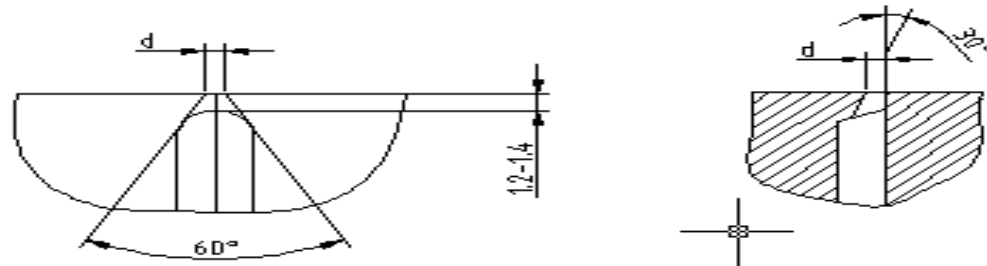


Figura 3 Entrada del material plástico a la cavidad del molde.

6. Acabados superficiales. Los acabados superficiales son especificados en los planos de las piezas, así como tolerancias de forma y posición.

7. Ciclo de moldeo

$$Ct = Tf + Ti + Tp$$

$$Tf = \frac{AS^2}{4a}$$

Donde:

Tf → Tiempo de frío

A → Constante del módulo de transferencia de calor

S → Espesor del artículo.

A → Factor de conductividad del calor.

$$V = \frac{TE - TWz}{TM - TWz}$$

Donde:

$$TM = 58942.25 \text{ } ^\circ K$$

$$TWz = 19190.5 \text{ } ^\circ K$$

$$TE = 24673.5 \text{ } ^\circ K$$

$$a = 0.065 \text{ mm}^2/\text{s}.$$

$$S = 5 \text{ mm}$$

$$V = 0,13$$

$$Tf = 91.3 \text{ s} \approx 92 \text{ s}$$

$$Ti = 1.5 \text{ s}$$

$$Tp = 3 \text{ s}$$

$$Ct = 96.5 \text{ s}$$

8. Máquina inyectora: 135 t

Esta selección se hace teniendo en cuenta el parque de máquinas inyectoras con que se cuenta, y las características de diseño de cada una de ellas. Entre los datos que se requieren están:

- Capacidad de inyección
- Fuerza de cierre.

- Dimensiones de los platos.
- Distancia entre columnas. Etc.

9. Cálculo del número de cavidades.

Se conoce previamente que el molde debe tener una sola cavidad pues para el caso que se analiza este estará sometido a un régimen de trabajo en que el número de piezas no es un factor determinante, pues solo se necesita una muestra pequeña de artículos que demuestre la viabilidad del moldeado de engranajes asimétricos. No obstante se realizará el cálculo del número de cavidades para mostrar el método y comprobar si la máquina seleccionada es la adecuada.

Por área proyectada

$$N = \frac{FC}{AP * Pi}$$

$$N = \frac{135Tm}{78cm^2 * 0.4Tm/cm^2} = 4.3 \text{ cavidades}$$

Por capacidad de inyección

$$N = \frac{CI}{GC} = \frac{353}{15} = 23.5 \text{ cavidades}$$

El molde consta de una sola cavidad.

Por tanto se puede afirmar que tanto por capacidad de inyección que por fuerza de cierre la máquina de inyección seleccionada responde con las exigencias requeridas para moldear.

10. Cálculo de enfriamiento

Datos

Peso del artículo: 64g

Ciclo de moldeo: 93 s

Número de cavidades: 1

Material: poliamida 66 (Nylon)

$I_s = 0$ [kJ/kg⁰K]

$ep = 0.000136$ [kJ/kg⁰K]

$TM = 58942.25$ °K

$TE = 24673.5$ °K

$$QCT = GM * ep * \Delta T + GM * I_s \quad [\text{kJ/s}]$$

$$GM = \frac{M * 3600}{Ct} = \frac{150 * 3600}{93} = 161.1 \text{ kJ/s}$$

$$\Delta Ta = TM - TE = 215 - 90 = 34268.750 \text{ °K}$$

$$QF = QCT - QP$$

$$QP = QCT * 0.3$$

$$QCT = 5806 * 0.88 * 125 + 0$$

$$QCT = 6.9kJ / s$$

$$QF = QCT - QP$$

$$QP = 2.063kJ / s$$

$$QF = 4.8kJ / s$$

$$A = \frac{QF}{\alpha * \Delta T}$$

$$\alpha = 0.00542kJ / m^2 s^\circ K$$

$$A = \frac{4141.2}{1280 * 8} = 0.4m^2$$

$$L = A / \pi * D = 0.4m^2 / \pi * 0.07m = 1.8m$$

$$L_{real} = 0.9m$$

Nota: La longitud real de las vías de enfriamiento del molde es de 0.9 m por lo que el enfriamiento no se logra a expensas del tiempo de frío pues el sistema no esta expuesto a régimen de producción en el que si es necesario reducir al máximo el ciclo de moldeo con el objetivo de disminuir costos de producción.

11. Sección del canal de alimentación utilizado.

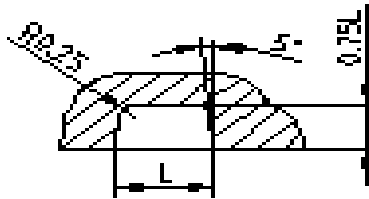


Figura 4 Canal de alimentación trapezoidal. [6]

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se muestran las fotos de la fabricación del molde, el propio molde y el engranaje plástico diseñado y fabricado.

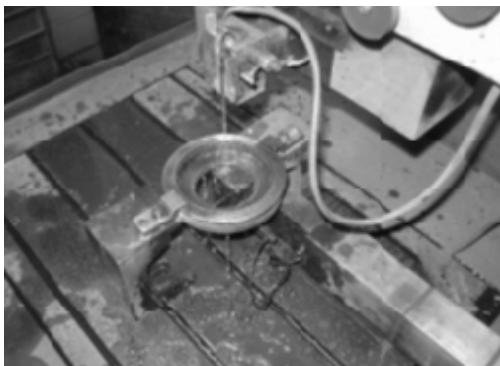


Figura 5 Proceso de electro erosión de un molde.



Figura 6 Máquina Electro - erosiva de Hilo durante el proceso de fabricación de la cavidad para un molde de un engranaje plástico asimétrico.



Figura 7 Molde para engranaje plástico asimétrico de perfil recto fabricado.

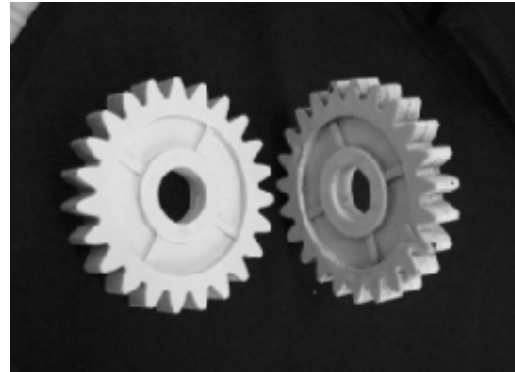


Figura 8 Rueda dentada plástica asimétrica de perfil recto moldeada.

CONCLUSIONES

- A través de la conjunción de las técnicas CAD-CAE-CAM se pueden fabricar engranajes plásticos con una gran precisión y con cualquier geometría del perfil del diente, los cuales pueden ser usados en diversas aplicaciones en la industria azucarera.
- Se fabricó un molde para engranajes plásticos asimétricos utilizando la técnica CAD y la erosión en hilo, lo cual constituye un tema novedoso para centros de investigación.
- En los engranajes plásticos la geometría juega un papel fundamental, ya que se pueden hacer modificaciones que no siempre se pueden hacer en los engranajes metálicos.
- Se demostró la factibilidad de fabricación de engranajes plásticos asimétricos corregidos. El molde diseñado y fabricado puede ser usado para engranajes con otros valores del módulo y ángulo de presión con solamente cambiar cavidades e insertos en un rango no mayor de 100 mm en diámetro exterior y espesores no mayores de 20 mm.

REFERENCIAS

1. A guide to Plastic Gearing, LNP Engineering Plastic Europe B. U, 1990.
2. Basic of Design Engineering – Plastic, Machine Design.1989.
3. Bell Von laamen Julie. Designing With Plastic. Mechanical Engineering, Diciembre 1995
Designing Whith Plastic, Hoechst Celanese Corp.
4. Erhord G. Cojinetes y Guías de Plásticos, Conferencia en UDI – Bildungswerk BW 562, Asociación de Ingenieros Alemanes, Dusseldorf, 1998.
5. Fritzing D. Basic Training for Plastic Gear. . Machine Design , 02/19/98, Vol. 70 Issue 3, p69
6. Gil García R., Fundamentos del Diseño de Artículos y Moldes para Inyección de Plástico, DISEMAH, 1997.
7. Joisten S., Ruedas Dentadas de Poliamida -6, 1998.
8. Kleiss R. , A Practical Guide for Molding Better Plastic Geared Transmission, 1997.
9. Kleiss R. , Kleiss J & Hoffmans S., The Generation of Precision Spur Gear Throught Wire Electrical Discharge Machining, AGMA Technical Paper 93FTM12, 1996.
10. Kang Chen Y., Wright N., Hooke Ch. J., Kukureta S., Failure Mechanisms in Plastic Gear, 1995.
11. Kapelevich A., Geometry and Design of Involute Spur Gear With AsimetricTeeh, 1998.
12. Mengues G., Mohren G., Moldes por Inyección de Plásticos, Editorial Pueblo y Educación, 1994.
13. Yet T., Yang D., Tong Sh., Desing of New Tooth Profiles for High-Load Capacity Gear, 1996.

Unidades y nomenclatura

- QCT Cantidad de calor cedido.
- QP Cantidad de pérdida de calor.
- QF Cantidad de frío en el molde.
- GM Peso de la inyección por hora.
- M Cantidad de agua fría.
- A Superficie de enfriamiento,
- L Longitud de las vías de enfriamiento.
- C Calor específico. ($\text{kJ} / \text{kgPa}^0\text{K}$).
- ΔT Diferencia de la temperatura media en el canal. (de la pared al punto medio, en la práctica,
- ΔT_a Diferencia de temperatura entre el cilindro de inyección y el artículo.
- ΔT_o Diferencia de temperaturas entre la entrada del agua y la salida.
- TZ Ciclo de moldeo (s).
- P Peso (g).
- kJ / s kilo -joule/segundo
- m^3 Metros cúbicos
- m^2 Metros cuadrados
- K Grados Kelvin