

# MECANISMOS FISICOS DE LA APLICACION DE LUBRICANTES SOLIDOS

P.F. Mendez, I. Odriozola, R. Herrera  
Centro de Investigación Industrial (CINI), FUDETEC  
Simini s/n, 2804 Campana, Buenos Aires, ARGENTINA

## Resumen:

Se presenta un análisis del proceso de aplicación de lubricantes sólidos utilizados en procesos de forja y conformado en caliente.

En este trabajo se propone un modelo simple que describe la aplicación de lubricantes sólidos. Esta está condicionada principalmente por la temperatura superficial del herramental durante la aplicación. Evidencia experimental demuestra que existe una temperatura máxima, que llamamos aquí temperatura de pegado ( $T_p$ ), que es la máxima temperatura superficial a la cual el grafito queda adherido al herramental. A temperaturas superiores a ésta, el líquido que transporta al grafito se evapora con una cinética tal que no permite la adhesión de éste. Una vez conocida esta temperatura, mediante un análisis del proceso de transferencia térmica entre el herramental y el spray, es posible determinar la cantidad de lubricante aplicada. La aplicación de este modelo permite también, conociendo la cantidad de lubricante que se quiere aplicar, y temperatura del herramental, calcular los caudales en juego de manera de seleccionar los picos aplicadores.

## Introducción:

El objetivo de este estudio es generar los conocimientos que permitan comprender y predecir la aplicación de lubricantes sólidos. En base al conocimiento desarrollado resultaría posible controlar a voluntad las variables durante la lubricación industrial en procesos de forja y conformado en caliente. Este conocimiento es necesario para lograr la aplicación sobre herramental altas temperaturas (aprox 500 C) de manera de mejorar la productividad, y al mismo tiempo disminuir el efecto de "die chilling" (enfriamiento súbito de la pieza al entrar en contacto con el herramental). Este conocimiento resultará también útil para determinar el set-up de los dispositivos de aplicación de manera de economizar lubricante.

La aplicación de estos lubricantes se realiza a través de la proyección de un spray compuesto por polvo de grafito en suspensión coloidal en agua, con una pequeña proporción de aditivos. Este lubricante se aplica sobre el herramental de conformado mientras este último está caliente. El mecanismo de aplicación está regido fundamentalmente por el proceso de transferencia térmica de la superficie del herramental al spray así como por la cinética de ebullición superficial. Los componentes líquidos del spray se evaporan o evacúan durante la aplicación. El resultado final del proceso es la obtención de una capa de grafito adherida a la superficie del herramental.

## Proceso de aplicación de lubricante:

Generalmente, el lubricante suele aplicarse a temperaturas superiores a la temperatura de pegado ( $T_p$ ). De esta manera la superficie caliente comienza un proceso de enfriamiento a lo largo del cual puede llegar a alcanzar esta temperatura característica. La curva de la Figura 1 muestra el enfriamiento de una probeta de 40 mm de diámetro enfriada por un spray en forma normal. La evolución de la temperatura superficial fue obtenida con una termocupla de

alta velocidad de respuesta soldada por descarga capacitiva a la superficie a lubricar.

### Modelo Unidimensional de Aplicación de Lubricante:

Por simplicidad, se analizará la refrigeración de una placa plana inicialmente isotérmica. En este caso, la temperatura de cada punto del material depende sólo de la profundidad bajo la superficie (x) y del tiempo transcurrido (t).

Para simplificar el cálculo se supondrá que dentro del rango de temperaturas superficiales de interés, el calor es extraído por convección, y el coeficiente característico (h) es constante. Esta suposición coincide muy bien con las experiencias realizadas en laboratorio (Figura 1). La solución analítica para este caso es (ref.1):

$$T_{sup} = T_o - (T_o - T_{amb}) [1 - \exp(w^2) \operatorname{erfc}(w)] \quad (1)$$

$$w = \frac{h\sqrt{\alpha t}}{k} \quad (2)$$

$T_{sup}$  = temperatura superficial en un tiempo t  
 $T_o$  = temperatura inicial del herramental  
 $T_{amb}$  = temperatura ambiente  
 $\operatorname{erfc}$  = función error complementaria  
 $h$  = coeficiente de convección  
 $\alpha$  = difusividad térmica del material del herramental  
 $t$  = tiempo  
 $k$  = conductividad térmica del material del herramental

En base a los resultados experimentales, es posible determinar que la temperatura superficial debe ser inferior a un valor característico (temperatura de pegado,  $T_p$ ) para que comience la adhesión del grafito. Esta temperatura depende de las propiedades del spray (tamaño y velocidad de gota), del líquido (densidad, tensión superficial, presencia de aditivos), así como de la superficie sobre la cual se aplica (rugosidad, presencia de óxidos, limpieza) (ref. 2 a 6).

En este modelo se supone que sólo una parte del spray que es proyectado sobre la superficie es evaporada ( $\eta_s$ ), y que a su vez sólo una proporción,  $\eta_g$ , del grafito contenido en el volumen evaporado se adhiere efectivamente a la superficie. Por lo tanto la cantidad de grafito adherida durante una aplicación de duración t, mayor a  $t_p$  resulta:

$$m_g = \eta_g \cdot x_g \cdot m \cdot \int_{t_p}^{t_{ap}} \eta_s dt \quad (3)$$

$m_g$  = masa de grafito por unidad de superficie efectivamente adherida  
 $\eta_g$  = proporción del grafito contenida en el líquido evaporado que queda efectivamente adherida.  
 $x_g$  = proporción en peso de grafito en el líquido  
 $m$  = caudal incidente por unidad de área  
 $t_p$  = tiempo que tarda el grafito en comenzar a pegar (ver Figura 1)  
 $t_{ap}$  = duración de la aplicación  
 $\eta_s$  = rendimiento del spray

La variable  $\eta_s$  representa la relación entre el calor efectivamente extraído y el calor que se extraería evaporando totalmente el líquido incidente. Es también la relación entre la masa de líquido evaporada y el caudal incidente por unidad de área.

El valor de  $\eta_s$  varía durante la aplicación ya que depende fuertemente de la temperatura superficial, y puede calcularse como:

$$\eta_s = \frac{h (T_{sup} - T_{amb})}{\dot{m} [r + c_p (T_s - T_{amb})]} \quad (4)$$

$r$  = calor latente de vaporización del líquido

$c_p$  = calor específico del líquido (medio entre  $T_s$  y  $T_{amb}$ )

$T_s$  = temperatura de saturación (ebullición) del líquido a presión atmosférica

El valor de  $t_p$  se obtiene reemplazando  $T_{sup}$  por  $T_p$  en la ecuación (1) y despejando  $w$ , a partir de lo cual, con la ecuación (2) es posible calcular directamente  $t_p$ .

#### Resultados experimentales:

Se realizaron experiencias para determinar la temperatura de pegado  $T_p$  y el rendimiento de la adhesión de grafito  $\eta_g$  para la aplicación de lubricante sobre herramental de acero AISI H13. En la Figura 2 se presentan los resultados de las experiencias realizadas sobre tres probetas de 40 mm de diámetro. Las características del spray posibilitan tratar al problema en forma unidimensional.

El coeficiente de convección  $h$  se determinó ajustando la curva de enfriamiento dada por la ecuación 1 con los datos experimentales de la Figura 1.

Los valores de los parámetros del ensayo fueron los siguientes:

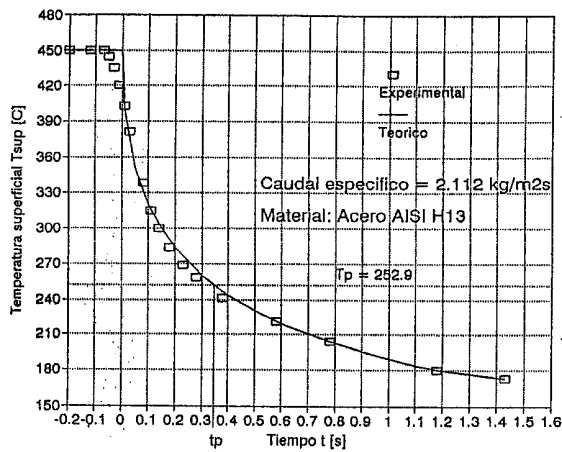
$T_{amb} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\dot{m} = 2.112 \text{ kg/m}^2\text{s}$
$h = 13262 \text{ W/m}^2\text{K}$	$t_{ap} = 0.25 \text{ s}$
$\alpha = 5.88 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$r = 2.26 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$
$k = 28.5 \text{ W/m}$	$c_p = 4.18 \cdot 10^3 \text{ J/kg K}$
$x_g = 0.0507$	$T_s = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$

Las estimaciones teóricas dados por la ecuación (3) se ajustaron a los valores experimentales minimizando el error cuadrático total. Este procedimiento se realizó para cada probeta individualmente, y para todas en conjunto, de manera de estimar la dispersión de la medición. De esta manera se determinó:

$$T_p = 242.1 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (min} = 240.4 \text{ } ^\circ\text{C, max} = 242.4 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\eta_g = 1.095 \text{ (min} = 1.022, \text{ max} = 1.195)$$

Si bien  $\eta_g$  tiene un valor cercano a la unidad, no resulta evidente la razón por la cual es mayor que uno. Este hecho es actualmente motivo de estudios más detallados.



**Figura 1**  
**Enfriamiento de la superficie**  
**durante la aplicación de lubricante**

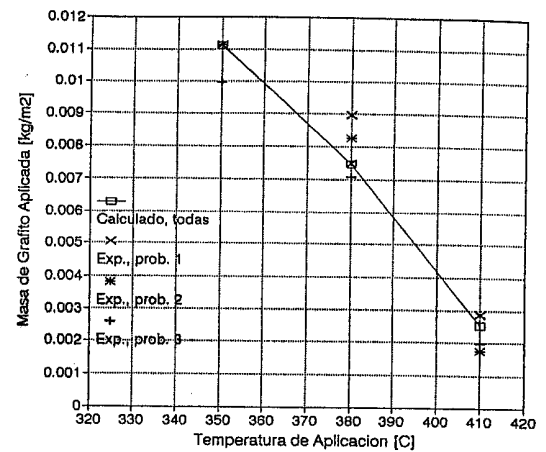
### Conclusiones:

Se determinó que el fenómeno que condiciona la aplicación de lubricantes sólidos es la transferencia térmica entre el herramental y el spray. Existe una temperatura máxima, llamada aquí temperatura de pegado ( $T_p$ ), por encima de la cual no se adhiere grafito. En base al conocimiento de esta temperatura es posible calcular la cantidad de lubricante adherida luego de una aplicación (ecuación (3)).

También es posible recorrer el camino inverso, sabiendo la cantidad de lubricante que se quiere aplicar (ref. 7), y a que temperatura se pretende hacerlo, determinar las características del spray (set-up industrial de los aplicadores). De esta manera es posible seleccionar la temperatura del herramental de acuerdo a las condiciones óptimas de conformado, sin la limitación de la temperatura máxima impuesta por la aplicación del lubricante. Esto redundará en un mejor control del proceso de conformado, en la posibilidad de conformar productos de geometrías o tamaños difíciles, así como en una mejora general de la productividad.

### Referencias:

1. Incropera F. P., De Witt D.P.; Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Second Edition; John Wiley & Sons, 1985.
2. Bolle L., Moureau J. Cl.; Spray Cooling of Hot Surfaces; Multiphase Science and Technology, pp. 1-97. Hemisphere, Washington DC (1982).
3. Deb S., Yao S.C.; Analysis on film boiling heat transfer of impacting sprays; Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 32, No. 11, pp. 2099-2112, 1989.
4. Choi K. J., Yao S. C.; Mechanisms of film boiling heat transfer of normally impacting spray. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 30, No. 2, pp. 311-318, 1987.
5. Wachters L. H., Westerling N. A., The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state, Chem. Eng. Sc., 21, 923-926.
6. Klinzing W. P., Rozzi J.C., Mudawar I.; Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays; J. Heat Treating (1992) 9:91-103
7. P. F. Mendez, R. Herrera; Fundamentos y Estudio de Sensibilidad del Ensayo de Compresión de Anillos; XVII Jornadas Metalúrgicas de la SAM, Abril 1993.



**Figura 2**  
**Masa de Grafito Adherida**