
CAPÍTULO III

Formado de Metales y Trabajo con Lámina Metálica

3.1. FUDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES

El formado de metales incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación resulta del uso de una herramienta que usualmente es un *dado* para formar metales, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. Por tanto, el metal se deforma para tornar la forma que determina la geometría del dado.

En general, se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de formado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan. Para formar exitosamente un metal éste debe poseer ciertas propiedades. Las propiedades convenientes para el formado son generalmente una baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad. Estas propiedades son afectadas por la temperatura. La ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando se aumenta la temperatura de trabajo. El efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente. La velocidad de formación y la fricción son factores adicionales que afectan el desempeño del formado de metales. En este capítulo examinaremos dichos aspectos, pero primero proporcionamos una visión general de los procesos de formado de metales.

3.1.1. PRINCIPIO DEL FORMADO DE METALES

3.1.1.1. Proceso de deformación volumétrica

Los procesos del formado se pueden clasificar en: 1) procesos de deformación volumétrica y 2) procesos de trabajo metálico. Estas dos categorías se cubren en detalle en la sesión 3.2 y 3.3, respectivamente.

Los procesos de deformación volumétrica se caracterizan por deformaciones significativas y cambios de forma, la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término *volumétrico* describe a las partes de trabajo que tienen esta baja relación de área volumen. La forma del trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares. La operación básica en deformación volumétrica se ilustra en la figura 3.1 como sigue:

- *Laminado*. Es un proceso de deformación por compresión en el cual el espesor de una plancha o placa se reduce por medio de herramientas cilíndricas opuestas llamadas rodillos. Los rodillos giran para estirar la placa y realizar el trabajo dentro de la abertura entre ellos y comprimirla.
- *Forjado*. En el Forjado se comprime una pieza de trabajo entre dos dados opuestos, de manera que la forma del dado se imprima para obtener el trabajo requerido. El forjado es un proceso tradicional de trabajo en caliente, pero muchos tipos de forjado se hacen también en frío.

- *Extrusión.* Es un proceso de compresión en el cual se fuerza el metal de trabajo a fluir a través de la abertura de un dado para que tome, la forma de la abertura de éste en su sección transversal.
- *Estirado.* En este proceso de formado, el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira del alambre a través de la abertura del dado.

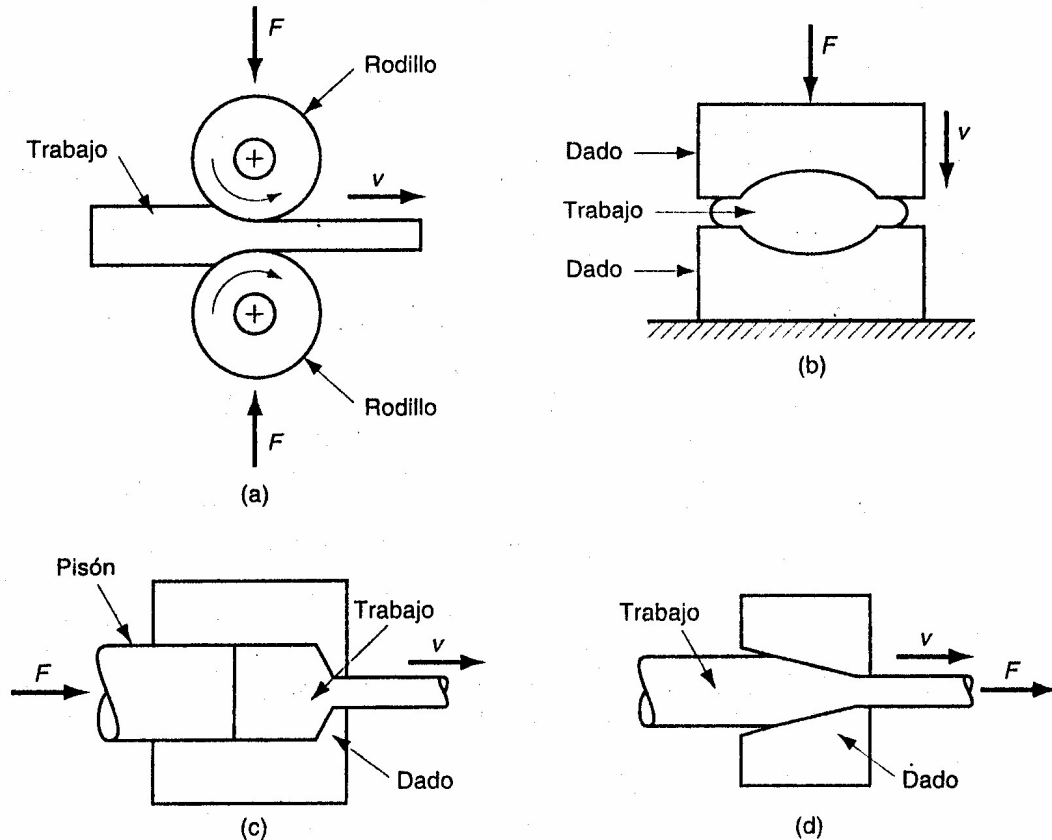


FIGURA 3,1 Procesos básicos de deformación volumétrica: (a) laminado (b) forjado (c) extrusión y (d) estirado. El movimiento relativo en las operaciones se indica por v , y las se indican por F .

3.1.1.2. Trabajo de láminas metálicas

Los procesos de trabajo con láminas metálicas son operaciones de formado o preformado de láminas de metal, tiras y rollos. La relación entre el área superficial y el volumen del material inicial es alta; por lo que esta relación es un medio útil para diferenciar la deformación volumétrica de los procesos con láminas metálicas. *Prensado* es el término que se aplica frecuentemente a las operaciones con láminas metálicas, debido a que las máquinas utilizadas para desempeñar estas operaciones son prensas (se usan también prensas de varios tipos en otros procesos de manufactura). La parte producida en una operación de laminado metálico se llama frecuentemente *estampado*.

Las operaciones con láminas metálicas se ejecutan siempre en frío y se utiliza un juego de herramientas llamadas *punzón* y *dado*. El punzón es la porción positiva y el dado es la porción negativa

del juego de herramientas. Las operaciones básicas con láminas de metal se describen en la figura 3.2 y se definen como sigue:

- *Doblado*, El doblado implica la deformación de una lámina metálica o placa para que adopte un ángulo con respecto a un eje recto, en la mayoría de los casos.
- *Embutido* (estirado). En el trabajo de láminas metálicas, el embutido se refiere a la transformación de una lámina plana de metal en una forma hueca o cóncava, como una copa, mediante el estirado del metal. Se usa un sujetador para mantener fija la plantilla, mientras el punzón empuja la lámina de metal, como se muestra en la figura 3.2 (b). Para distinguir esta operación del estirado de barras y alambres, se usan frecuentemente los términos *embutido o estirado en copa o embutido profundo*.
- *Corte*. Este proceso queda de alguna manera fuera de lugar en nuestra lista de procesos de deformación, debido a que implica más el corte que el formado del metal. En esta operación se corta la parte usando un punzón y un dado, como se muestra en la figura 3.2 (c). Aunque éste no es un proceso de formado se incluye aquí debido a que es una operación necesaria y muy común en el trabajo de láminas metálicas.

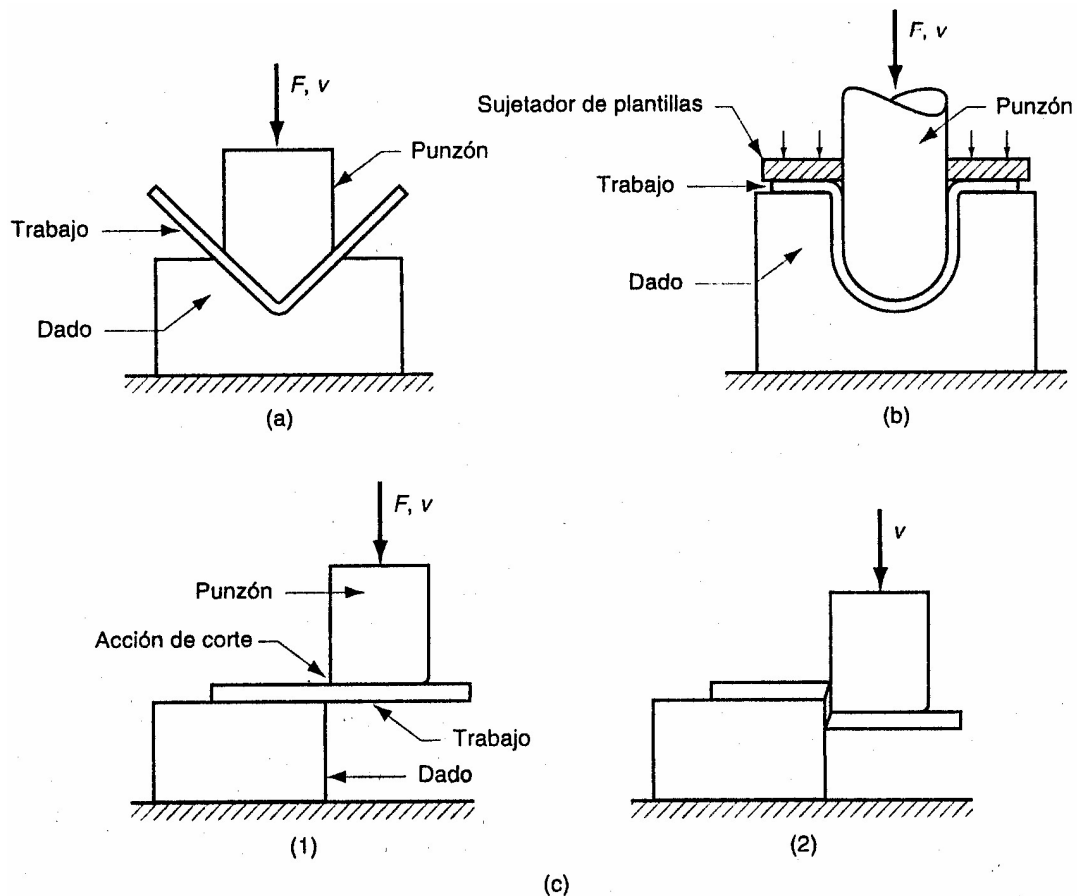


FIGURA 3.2 Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas: (a) doblado, (b) embutido y (c) corte; (1) al primer contacto del punzón con la lámina y (2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por F y v .

3.1.2. COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES

La curva esfuerzo-deformación ofrece una visión que permite comprender el comportamiento de los metales durante su formación. La curva típica de esfuerzo-deformación para la mayoría de los metales se divide en una región elástica y una región plástica. En el formado de un metal, la región plástica es de interés primordial debido a que en estos procesos el material se deforma plástica y permanentemente.

La relación típica esfuerzo-deformación presenta elasticidad por debajo del punto de fluencia, y endurecimiento por deformación arriba de dicho punto. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran este comportamiento en ejes lineales y logarítmicos. En la región plástica, el comportamiento del metal se expresa por la curva de fluencia:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (3.1)$$

Donde:

K = coeficiente de resistencia, (MPa);

n = es el exponente de endurecimiento por deformación.

El esfuerzo y la deformación en la curva de fluencia son esfuerzo real y deformación real. La curva de fluencia es generalmente válida como una relación que define el comportamiento plástico de un metal en el trabajo en frío. Los valores típicos de K y n para diferentes metales a temperatura ambiente se enlistan en la tabla 3.4.

3.1.2.1. Esfuerzo de fluencia

La curva de fluencia describe la relación esfuerzo-deformación en la región donde tiene lugar el formado del metal. También indica el esfuerzo de fluencia del metal, la propiedad de resistencia que determina las fuerzas y la potencia requerida para realizar una operación particular de formado.

La gráfica esfuerzo-deformación de la figura 3.5 muestra que cuando la mayoría de los metales se deforman a temperatura ambiente, aumentan su resistencia debido al endurecimiento por deformación. El esfuerzo requerido para continuar la deformación debe incrementarse para contrarrestar este incremento de la resistencia. El *esfuerzo de fluencia* se define como el valor instantáneo del esfuerzo requerido para continuar la deformación del material o mantener "fluyendo" al metal. Ésta es la resistencia a la fluencia del metal en función de la deformación, que puede expresarse como:

$$Y_f = K\varepsilon^n \quad (3.2)$$

Donde

Y_f = esfuerzo de fluencia, (Mpa).

En las operaciones de formado individual que se revisarán en las dos secciones siguientes, se puede usar el esfuerzo de fluencia instantáneo para analizar la secuencia del proceso. Por ejemplo, en ciertas operaciones de forja se puede determinar la fuerza instantánea durante la compresión a

3.1.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE DEFORMACIÓN

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles con el trabajo en frío o el trabajo que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recristalización. La razón principal es que la curva de fluencia del metal trabajado en caliente tiene un coeficiente de resistencia sustancialmente menor que a temperatura ambiente, el exponente de endurecimiento por deformación es cero (al menos teóricamente), y la ductilidad del metal se incrementa significativamente. Todo esto da por resultado las siguientes ventajas con respecto al trabajo en frío: 1) la forma de la parte de trabajo se puede alterar significativamente, 2) se requiere menor potencia para deformar el metal, 3) los metales que usualmente se fracturan en el trabajo en frío, pueden formarse en caliente, 4) las propiedades de resistencia son generalmente isotrópicas debido a la ausencia de una estructura orientada de granos creada en el trabajo en frío, 5) el trabajo en caliente no produce fortalecimiento de la parte. Esta última ventaja puede parecer inconsistente, ya que el aumento en la resistencia del metal se considera frecuentemente esta es una ventaja del trabajo en frío. Sin embargo, hay aplicaciones en las cuales es indeseable que el metal se endurezca por trabajo debido a que reduce su ductilidad, por ejemplo, cuando la parte tiene que procesarse posteriormente en frío. Otras desventajas son: precisión dimensional más baja, mayores requerimientos de energía (energía térmica para calentar la pieza de trabajo), oxidación de la superficie de trabajo (incrustaciones), acabado superficial más pobre y menor duración en la vida de las herramientas.

La recristalización del metal en el trabajo en caliente involucra difusión atómica, proceso que depende del tiempo. Las operaciones de formado del metal se desempeñan frecuentemente a altas velocidades que no dejan tiempo suficiente para completar la recristalización de la estructura granular durante el ciclo de deformación. Sin embargo, debido a las altas temperaturas, la recristalización sólo ocurre eventualmente; ya sea inmediatamente después del proceso de formado o más tarde, al enfriarse la pieza de trabajo. Aun si la recristalización ocurre después de la verdadera deformación, su ocurrencia eventual junto con el suavizado sustancial del metal a altas temperaturas es la característica que distingue al trabajo en caliente del trabajo en tibio o en frío.

Formado isotérmico Ciertos metales como los aceros altamente aleados (por ejemplo, acero de alta velocidad), Muchas aleaciones de titanio y las aleaciones de níquel para altas temperaturas poseen buena dureza en caliente, esta propiedad los hace útiles para el servicio a altas temperaturas. Y aunque dichas propiedades los hacen atractivos para estas aplicaciones, también los hace difíciles de formar por métodos convencionales. El problema es que cuando estos metales se calientan a las temperaturas de trabajo en caliente y entran en contacto con las herramientas de formado relativamente frías, el calor es

transferido rápidamente fuera de la superficie de la parte, elevando la resistencia en estas regiones. La variación en la temperatura y la resistencia en diferentes regiones de la pieza de trabajo producen patrones de flujo irregular en el metal durante la deformación esto conduce a la formación de esfuerzos residuales y al posible agrietamiento superficial.

El formado isotérmico se refiere a las operaciones de formado que se llevan a cabo de tal manera que eliminan el enfriamiento superficial y los gradientes térmicos resultantes en la pieza de trabajo. Se realiza por precalentamiento de las herramientas que entran en contacto con la parte a la misma temperatura de trabajo del metal. Esto desgasta las herramientas y reduce su vida, pero evita los problemas descritos cuando los metales difíciles se forman por métodos convencionales. En algunos casos el formado isotérmico representa la única forma en que pueden formarse estos materiales de trabajo. El procedimiento se asocia más estrechamente con el forjado, revisaremos el forjado isotérmico en la sección 3.2.

3.1.4. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION

En el trabajo en caliente, un metal se comporta teóricamente como un material perfectamente plástico, con un exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$. Esto significa que una vez que se alcanza el nivel del esfuerzo de fluencia, el metal debe continuar fluyendo bajo el mismo nivel de esfuerzo. Sin embargo, un fenómeno adicional caracteriza el comportamiento de los metales durante su deformación, especialmente a las temperaturas elevadas del trabajo en caliente. Este fenómeno es la sensibilidad a la velocidad de deformación. En nuestra revisión, empezaremos por definir la velocidad de deformación,

La rapidez a la que se deforma el metal en un proceso de formado se relaciona directamente con la velocidad de deformación v . En muchas operaciones de formado, la velocidad de deformación es igual a la velocidad del punzón o de cualquier otro elemento móvil del equipo. Esto se visualiza más fácilmente en un ensayo de tensión, como la velocidad del cabezal de la máquina con respecto al cabezal. Dada la rapidez de deformación, la *velocidad de deformación* se define:

$$\varepsilon = \frac{v}{h} \quad (3.3)$$

Donde:

ε = velocidad de deformación real, (m/seg/m), o simplemente s⁻¹;

h = altura instantánea de la pieza de trabajo que se deforma, (m).

Si la velocidad de deformación v es constante durante la operación, entonces ésta varía al cambiar h (debido al esfuerzo de tensión o compresión). En la mayoría de las operaciones prácticas de formado, la valoración de la velocidad de deformación se complica por la geometría de la parte de trabajo y las variaciones en la velocidad de deformación en diferentes regiones de la parte. La velocidad de

deformación puede alcanzar 1000 s^{-1} o más para algunos procesos de formado de metal como laminado y forjado a alta velocidad.

Ya hemos observado que el esfuerzo de fluencia de un metal es una función de la temperatura. En las temperaturas del trabajo en caliente, el esfuerzo de fluencia depende de la velocidad de deformación. El efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades de resistencia se conoce como *sensibilidad a la velocidad de deformación*. El efecto se puede ver en la figura 3.4. Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación. Esto se representa usualmente como una línea aproximadamente recta en una gráfica log-log, lo cual conduce a la siguiente relación.

$$Y_f = C\dot{\epsilon}^m \quad (3.4)$$

Dónde:

C = es la constante de resistencia (similar pero no igual al coeficiente de resistencia en la ecuación 3.1 de la curva de fluencia)

m = es el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación.

El valor de C se determina a una velocidad de deformación de 1.0 y m es la pendiente de la curva en la figura 3.4 (b).

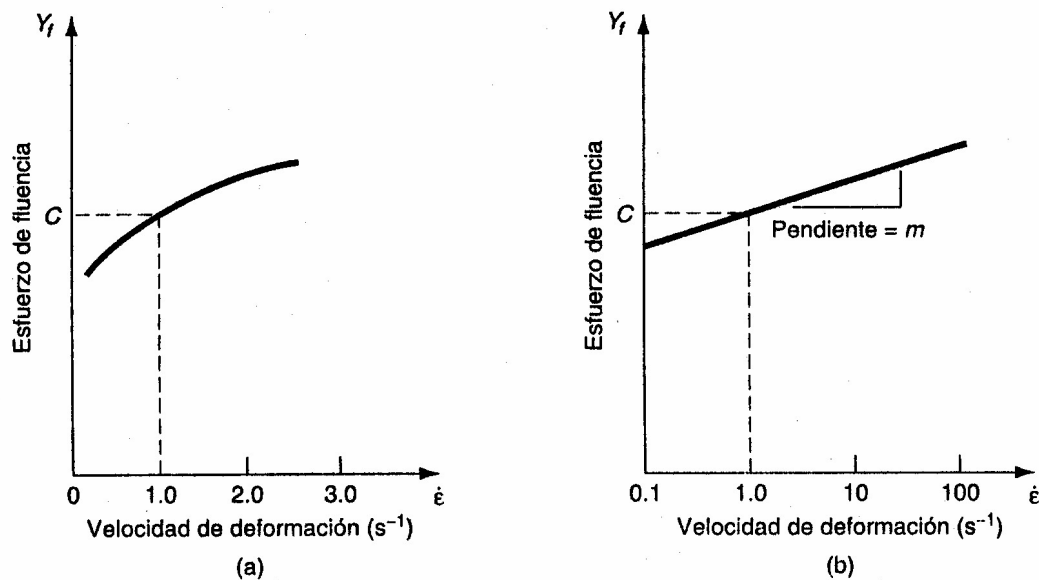


FIGURA 20.4 (a) Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia a temperatura de trabajo elevada, (b) la misma relación graficada en coordenadas log-log.

El efecto de la temperatura sobre los parámetros de la ecuación 3.4 es bastante pronunciado. Al incrementar la temperatura, decrece el valor de C (consistente con su efecto sobre K en la ecuación 3.1 de la curva de fluencia) y aumenta el valor de m . El resultado general se puede ver en la figura 3.5. A temperatura ambiente el efecto de la velocidad de deformación es casi despreciable, e indica que la curva de fluencia es una buena representación del comportamiento del material. A medida que aumenta la

temperatura, la velocidad de deformación juega un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia, como se indica por las pendientes más grandes de las relaciones deformación-velocidad. Esto es importante en el trabajo en caliente porque la resistencia a la deformación del material aumenta dramáticamente con el incremento de la velocidad de deformación. Para dar una idea del efecto, en la tabla 20.1 se dan los valores típicos de m para los tres rangos de temperatura del trabajo en metales.

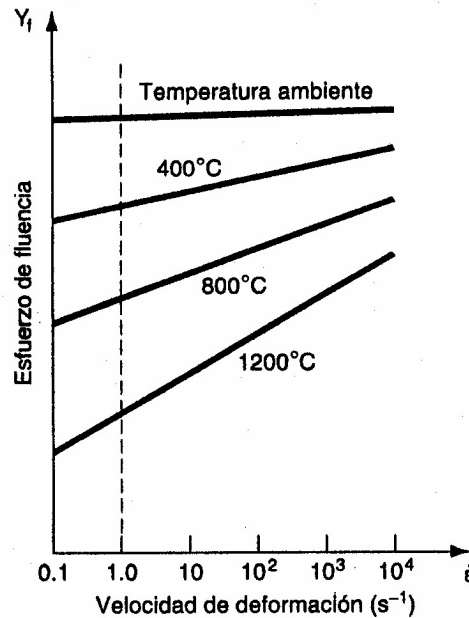


FIGURA 20.5 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia para un metal típico. la constante C en la ecuación 20.4, dicada por la intersección de cada línea continua con la línea punteada vertical a una velocidad de deformación = 1.0, decrece, y m pendiente de cada línea) aumenta al incrementarse la temperatura.

TABLA 3.1 Valores típicos de temperatura, sensibilidad a la velocidad de deformación, y coeficiente de fricción en trabajo en frío, tibio y caliente.

Categoría	Rango de Temperatura	Exponente de Sensibilidad	Coefficiente de Fricción
Trabajo en frío	$\leq 0.3T_m$	$0 \leq m \leq 0.05$	0.1
Trabajo a $0.3 T_m$	$\leq 0.3T_m - 0.5T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.1$	0.2
Trabajo en caliente	$\leq 0.5T_m - 0.75T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.4$	0.2 – 0.5

Podemos observar que aun en el trabajo en frío la velocidad de deformación puede tener un efecto mínimo sobre el esfuerzo de fluencia. En el trabajo en caliente el efecto puede ser significativo. Una expresión más completa para el esfuerzo de fluencia como función de la deformación y de la velocidad de deformación podría ser la siguiente:

$$Y_f = A \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \tag{3.5}$$

Donde:

A = coeficiente de resistencia que combina los efectos de los valores previos de K y de C . A , n y m podrían ser funciones de la temperatura,

3.1.5. FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN

En la presente sección nos enfocaremos a los efectos de la fricción en las operaciones de formado de metales y al uso de los lubricantes para mitigar estos efectos.

3.1.5.1. Fricción en el formado de metales

La fricción en el formado de metales es diferente a la que se encuentra en la mayoría de los sistemas mecánicos, como cajas de engranes, rodamientos y otros componentes que involucran un movimiento relativo entre las superficies. Estos casos se caracterizan generalmente por bajas presiones de contacto, temperaturas entre bajas y moderadas, y una lubricación amplia para minimizar el contacto entre los metales. Por el contrario, las condiciones en el formado de metales representan presiones altas entre la superficie dura de la herramienta y la parte suave de trabajo, deformación plástica del material más suave y altas temperaturas (al menos en el trabajo en caliente). Estas condiciones pueden generar coeficientes de fricción relativamente altos en el metal de trabajo, incluso con la adición de lubricantes. Los valores típicos del coeficiente de fricción para las tres categorías de formado de metales aparecen en la tabla 3.1

La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajo, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En la mayoría de los procesos de formado, la fricción es inconveniente por las siguientes razones: 1) retarda el flujo del metal en el trabajo, ocasionando esfuerzos residuales y algunas veces defectos del producto, 2) se incrementan las fuerzas y la potencia para desempeñar la operación, 3) ocurre un rápido desgaste de las herramientas. El desgaste de la herramienta puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, y por ende a la fabricación de piezas defectuosas y al reemplazo de las herramientas. Como las herramientas para formado de metales son generalmente costosas, esto tiene una mayor importancia. La fricción y el desgaste de las herramientas son más severos en el trabajo en caliente, debido a las condiciones más rudas.

Si el coeficiente de fricción llega a ser lo suficientemente grande ocurre una condición conocida como adherencia. La *adherencia* en el trabajo de metales (también llamada *adherencia por fricción*) es la tendencia de dos superficies en movimiento relativo a pegarse una a la otra en lugar de deslizarse. Esto significa que el esfuerzo de fricción entre las superficies excede al esfuerzo de flujo cortante del metal de trabajo, ocasionando que el metal se deforme por un proceso de corte por debajo de la superficie, en lugar de que ocurra un deslizamiento entre las superficies. La adherencia ocurre en las operaciones de formado de metal y es un problema prominente en el laminado; revisaremos esto en la sección 3.2

3.1.5.2. Lubricantes en el formado de metales

Los lubricantes para el trabajo de los metales se aplican en la interfase herramienta - trabajo en muchas operaciones de formado para reducir los perjudiciales efectos de la fricción. Los beneficios que se obtienen de su aplicación incluyen la reducción en la adherencia, en las fuerzas, en la potencia y en el desgaste de las herramientas, así como un mejor acabado de la superficie en el producto final, Los lubricantes tienen también otras funciones como reducir el calor de las herramientas.

Las consideraciones para escoger un lubricante apropiado para el trabajo de metales incluyen el tipo de procesos de formado que se va a utilizar (laminado, forjado, embutido de lámina metálica u otros), ya sea trabajo en caliente o trabajo en frío, así como el material de trabajo, la reactividad química con la herramienta y con los metales de trabajo (por lo general, es deseable que los lubricantes se adhieran a las superficies para que sean más efectivos en la reducción de la fricción), facilidad de aplicación, toxicidad, inflamabilidad y costo.

Los lubricantes usados para operaciones de trabajo en frío incluyen aceites minerales grasas y aceites grasos, emulsiones en agua, jabones y otros recubrimientos [3,5]. El trabajo en caliente se realiza algunas veces en seco para ciertas operaciones y materiales (por ejemplo el laminado en caliente del acero y la extrusión de aluminio. Cuando los lubricantes se usan para trabajo en caliente incluyen aceites minerales, grafito y vidrio. El vidrio fundido se convierte en un lubricante efectivo para la extrusión de aleaciones de acero. El grafito contenido en agua o aceite mineral es un lubricante común para el forjado en caliente de varios materiales de trabajo. En las referencias [5] y [6] se encuentran tratados más detallados de los lubricantes en el trabajo de metales.