

7. SALIDA TÉRMICA DE LAS BANDAS EXTENSOMÉTRICAS Y VARIACIÓN CON LA TEMPERATURA DEL FACTOR DE BANDA.

7.1. Introducción.

Idealmente, una banda extensométrica pegada a un elemento de ensayo respondería únicamente a la deformación aplicada en el elemento, y no se vería afectada por otras variables del medio ambiente. Desgraciadamente, la banda extensométrica resistiva, al igual que el resto de sensores, es algo menos que perfecta. La resistencia eléctrica de la banda extensométrica varía no sólo con la deformación, sino también con la temperatura. Además, la relación entre deformación y variación de la resistencia, el *factor de banda*, varía por sí mismo con la temperatura. Estas desviaciones del comportamiento ideal pueden ser importantes bajo ciertas circunstancias, y pueden causar errores significativos si no se tienen en cuenta adecuadamente. Cuando los fenómenos subyacentes se entienden debidamente, sin embargo, los errores pueden ser controlados o virtualmente eliminados por compensación o corrección.

En la *sección 7.2.*, se define la salida térmica (a veces calificada como "deformación aparente inducida por la temperatura"), y se describen las causas de este efecto. Se dan entonces las magnitudes típicas de la salida térmica, seguidas por los métodos usados comúnmente para compensación y corrección. La *sección 7.3.* trata sobre las variaciones del factor de banda con la temperatura de forma similar pero más breve ya que esta fuente de error es en general menos significativa. Los métodos para la corrección simultánea de los errores de la salida térmica y del factor de banda se dan en la *sección 7.4.*, acompañados por ejemplos numéricos.

7.2. Salida Térmica

Una vez que una banda extensométrica instalada es conectada a un indicador de deformación y que el instrumento está equilibrado, un cambio posterior en la temperatura de la instalación de la banda producirá normalmente un cambio de la resistencia. Este cambio de la resistencia inducido por la temperatura es independiente de, y no relacionado con, la deformación mecánica (inducida por tensión) en el objeto a ensayar al cual está pegada la banda extensométrica. Es totalmente debido al cambio de temperatura, y es llamada de esta manera la *salida térmica* de la banda.

La salida térmica de la banda es potencialmente la fuente de error más seria en la práctica de medida de deformación estática con bandas extensométricas. De hecho, al medir deformaciones a temperaturas distantes de la temperatura ambiente (o de la temperatura de equilibrio inicial del circuito de la banda), el error debido a la salida térmica, si no se controla, puede ser mucho mayor que la magnitud de la deformación que va a ser medida. A cualquier temperatura, o en cualquier rango de temperatura, esta fuente de error requiere una consideración cuidadosa; y es normalmente

necesario o compensar la salida térmica o corregir las medidas de deformación debido a su presencia.

La salida térmica es causada por dos efectos simultáneos y algebraicamente aditivos en la instalación de la banda extensométrica. Primero, la resistividad eléctrica de la rejilla conductora es un tanto dependiente de la temperatura; y, como resultado, la resistencia de la banda varía con la temperatura. La segunda contribución a la salida térmica es debida a la expansión térmica diferencial entre la rejilla conductora y el elemento de ensayo o material sustrato al cual está unida la banda. Con el cambio de la temperatura, el sustrato se expande o se comprime; y, dado que la banda extensométrica está firmemente unida al sustrato, la rejilla de la banda es forzada a experimentar la misma expansión o contracción. Hasta tal punto el coeficiente de expansión térmica de la rejilla difiere del coeficiente del sustrato, que la rejilla es deformada mecánicamente de acuerdo a la expansión o contracción libre del sustrato. Ya que la rejilla es, por diseño, sensible a la deformación, la banda presenta un cambio de resistencia proporcional a la expansión diferencial.

Cada uno de los dos cambios de resistencia inducidos térmicamente puede ser tanto positivo como negativo en signo con respecto al cambio de temperatura, y la salida térmica neta de la banda extensométrica es la suma algebraica de estos. Así, expresada en términos de cambio de resistencia unitaria, la salida térmica se convierte en:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{T/O} = \left[\beta_G + F_G \left(\frac{1 + K_t}{1 - \nu_0 K_t} \right) (\alpha_S - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (1)$$

donde, en unidades coherentes:

$(\Delta R/R_0)_{T/O}$ = cambio de resistencia unitario de la resistencia de referencia inicial, R_0 , debido a la salida térmica.

β_G = coeficiente térmico de resistencia de la rejilla conductora.

F_G = factor de banda de la banda extensométrica. †

K_t = sensibilidad transversal de la banda extensométrica.

ν_0 = coeficiente de Poisson (0,285) del material de ensayo estándar usado en la calibración del factor de banda de la banda.

$(\alpha_S - \alpha_G)$ = diferencia de los coeficientes de expansión térmica entre el sustrato y la rejilla, respectivamente.

ΔT = cambio de temperatura de una temperatura de referencia inicial arbitraria.

El factor de corrección de la sensibilidad transversal $[(1+K_t)/(1-\nu_0 K_t)]$ se incluye en la Ec. (1) para tener en cuenta el hecho de que la deformación en la rejilla de la banda debido a la expansión térmica diferencial es equi-biaxial, mientras el factor de banda, F_G , se refiere a la sensibilidad a la deformación según se calibró en un estado de tensión uniaxial, con un coeficiente de deformación principal de $1 / (-0,285)$.

No se debería suponer por la forma de la Ec. (1) que la salida térmica es lineal con el cambio de temperatura, porque todos los coeficientes entre paréntesis son funciones en sí mismos de la temperatura. La ecuación claramente demuestra, sin embargo, que la salida térmica depende no sólo de la naturaleza de la banda extensométrica, sino además del material al cual la banda está unida. A causa de esto, los datos de la salida térmica son significativos sólo cuando se refieren a un tipo particular de banda extensométrica, unido a un material sustrato específico.

Para mayor comodidad en la corrección de los datos de deformación medidos para los cambios de resistencia inducidos térmicamente, la salida térmica de la banda se expresa normalmente en unidades de deformación. Así, dividiendo la Ec. 1 por el ajuste del factor de banda del instrumento,

$$\varepsilon_{T/O} = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{T/O}}{F_I} = \frac{\left[\beta_G + F_G \left(\frac{1+K_t}{1-\nu_0 K_t} \right) (\alpha_s - \alpha_G) \right] \Delta T}{F_I} \quad (2)$$

donde:

$\varepsilon_{T/O}$ = salida térmica en unidades de deformación; esto es, la magnitud de la deformación registrada por un indicador de deformación (con un ajuste del factor de banda de F_I), cuando la instalación de la banda está sujeta a un cambio de temperatura, ΔT , bajo condiciones de expansión térmica libre para el sustrato.

Al medir deformaciones inducidas por tensión a una temperatura distinta de la temperatura de equilibrio inicial, la salida térmica de la Ec. 2 está superpuesta a la salida de la banda debido a la deformación mecánica, causando un error en la medida de esa magnitud. Muchos factores afectan a la salida térmica de las bandas extensométricas. Algunas de las más importantes son: el material y la forma del espécimen a ensayar, la aleación y el lote de la rejilla, las series de banda y el modelo, la sensibilidad transversal de la banda, los materiales adhesivos y de encapsulado, y los procedimientos de instalación. No es posible predecir con exactitud el valor de la salida térmica de cualquier banda cuando el usuario la haya adherido a una estructura a ensayar. Incluso en casos

donde las aplicaciones conllevan el mismo material en sus ensayos, las diferencias se pueden suponer debido a que las características de expansión térmica de los materiales estructurales varían lote a lote. La mejor práctica es siempre evaluar una o más bandas bajo condiciones térmicas aproximadas a aquellas que se van a encontrar en el programa de ensayo a ser posible.

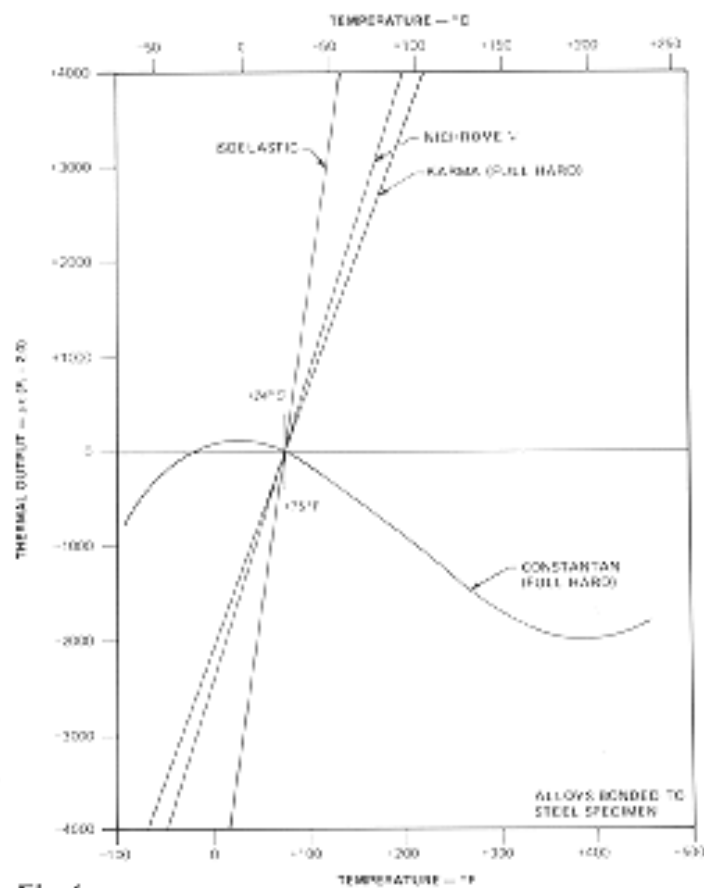


Fig. 1

La figura 1 muestra la variación de la salida térmica con la temperatura para una variedad de aleaciones de banda extensométrica adheridas a acero. Estos datos son únicamente ilustrativos, y no para uso en la realización de correcciones. Se debería considerar, de hecho, que las curvas para el Constantan y Karma no son aleaciones autocompensadas con la temperatura. Con la autocompensación con la temperatura, las características de la salida térmica de estas aleaciones se ajustan para minimizar el error por debajo del rango normal de las temperaturas de trabajo.

Según se indicó en la Fig. 1, los errores debidos a la salida térmica se pueden hacer extremadamente grandes según las temperaturas se desvían las temperaturas de la temperatura de referencia arbitraria (generalmente, la temperatura ambiente) con respecto a la cual se mide la salida térmica. La ilustración muestra claramente la necesidad de compensación o de corrección si se van a realizar medidas precisas de deformación estática durante cambios de temperatura en el medio ambiente.

Con respecto a la última afirmación, se debería advertir que si es factible situar el elemento a ensayar pegado a bandas a la temperatura del ensayo *en el medio ambiente del ensayo*, manteniendo el elemento a ensayar completamente libre de tensiones inducidas mecánica o térmicamente, y equilibrar el indicador de deformación a deformación nula en estas condiciones, no existe error en la salida térmica cuando se hacen medidas de deformación posteriores *a esa temperatura*. En otras palabras, cuando no ocurre cambio de temperatura alguno entre las condiciones sin tensión y con tensión, las medidas de deformación se pueden realizar sin compensación o corrección de la salida térmica. En la práctica, sin embargo, es extraño que los requerimientos precedentes se puedan satisfacer, y el analista de tensión normalmente encuentra necesario tomar en cuenta totalmente los efectos de la salida térmica.

Además, en el caso de medidas de deformación puramente dinámicas, donde no existe la necesidad de mantener una referencia de deformación nula estable, la salida térmica puede no ser significativa. Esto es debido a que la frecuencia de la señal de deformación dinámica, es normalmente muy alta con respecto a la frecuencia del cambio de temperatura, y las dos señales son fácilmente separables. Si, sin embargo, existe deformación estática/dinámica combinada, y la componente de deformación estática debe ser medida, o si la frecuencia del cambio de temperatura es del mismo orden que la frecuencia de deformación, los efectos de la salida térmica deben ser de nuevo considerados.

7.2.1. Compensación de la Salida Térmica

7.2.1.1. Banda de Compensación

En teoría, al menos, el error debido a la salida térmica se puede eliminar completamente por el uso, junto con la banda extensométrica "activa", pero conectada a una rama adyacente del circuito de puente de Wheatstone, una banda idéntica de compensación – montado en un espécimen sin deformación hecha de un material idéntico al del elemento de ensayo, y sometida siempre a la misma temperatura que la banda activa. Bajo estas condiciones hipotéticas, las salidas térmicas de las dos bandas deberían ser idénticas. Y, ya que los cambios de idéntica resistencia en ramas adyacentes del puente de Wheatstone no desequilibran al circuito, las salidas térmicas de las bandas extensométricas activa y de compensación deberían cancelarse exactamente – dejando únicamente la deformación inducida por tensión en la banda extensométrica activa para ser registrada por el indicador de deformación. Para que esto sea totalmente verdadero se requiere de forma adicional que los hilos de las bandas activas y de compensación sean de la misma longitud y estén situados juntos para que sus cambios de resistencia inducidos por la temperatura además coincidan idénticamente.

Los problemas principales encontrados en este método de compensación de la temperatura son aquellos que establecen y mantienen las tres conexiones de las condiciones idénticas postuladas anteriormente. Para empezar, a veces es muy difícil organizar el emplazamiento de un espécimen sin deformación del material a ensayar en el medio ambiente del ensayo; e incluso es más difícil asegurar que el espécimen permanezca sin deformación en estas condiciones de ensayo. Existe otra dificultad en asegurar que la temperatura de la banda de compensación del espécimen sin deformación es idéntica siempre a la temperatura de la banda activa. Este problema se hace particularmente severo cuando no existen gradientes o transitorios en el medio ambiente del ensayo. Y, como se indica en el párrafo anterior, se aplican las mismas consideraciones a los hilos conductores. Finalmente, se debe reconocer que las dos bandas extensométricas no son idénticas con precisión –incluso del mismo lote o paquete–. Para la mayoría de tácticas de medida de deformación estática en la vecindad general de la temperatura ambiente, la diferencia en la salida térmica entre dos bandas del mismo tipo procedentes del mismo lote es despreciable; pero la diferencia se puede hacer evidente (y significativa) al medir deformaciones en extremos de temperatura tales como aquellos en que aparece alta temperatura o trabajo criogénico. En estos casos, la corrección punto a punto de la salida térmica será necesaria normalmente. Con bandas no autocompensadas con la temperatura, la diferencias de banda a banda en la salida térmica pueden ser tan grandes como para evitar la compensación dummy para temperaturas que están lejos de la temperatura ambiente.

En general, cuando los tres criterios de identidad ya mencionados se pueden satisfacer de buen modo, el método de compensación con una banda de compensación es una técnica muy efectiva para controlar el error de la salida térmica. Existe, además, una clase especial de aplicaciones de medida de deformación que es particularmente adaptable a la compensación de salida térmica con una segunda banda. Esta clase consiste en aquellas aplicaciones en que la relación de las deformaciones en dos puntos diferentes pero adyacentes de cerca (o al menos adyacentes térmicamente) del objeto a ensayar son conocidas a priori. Se incluyen en esta clase barras a torsión pura, vigas a flexión, columnas, diafragmas, etc., todos sometidos a tensión con sus límites proporcionales respectivos. En estas aplicaciones, la banda de compensación con frecuencia se puede localizar estratégicamente en el miembro a ensayar de forma que se provean dos bandas activas que permanecen a las mismas variaciones de temperatura mientras las deformaciones medida son preferiblemente contrarias en signo y de relación conocida. Las dos bandas con ramas adyacentes del circuito de puente de Wheatstone funcionan entonces como medio puente activo.

Por ejemplo, cuando las medidas de deformación se van a realizar en una viga que es suficientemente delgada como para que bajo estas condiciones de ensayo las temperaturas en las dos superficies normales opuestas al plano de flexión sean las mismas, las dos bandas extensométricas se pueden instalar directamente enfrentadas en estas superficies (Fig. 2a). El medio puente activo así formado dará compensación de temperatura efectiva sobre un rango de temperaturas razonable y, ya que las deformaciones medidas por las bandas son iguales en magnitud y opuestas en signo, doblarán la señal de salida del puente de Wheatstone. De forma

similar, para una barra a torsión pura (Fig. 2b), las dos bandas se pueden instalar adyacentes una a la otra y alineadas a lo largo de los ejes principales de la barra (a 45° del eje longitudinal). Como en el caso de la viga, se puede conseguir una compensación excelente, con una señal de salida duplicada.

Al realizar medidas de deformación a lo largo del eje de una columna o conexión de tensión, la banda de compensación se puede montar en el miembro de ensayo adyacente a la banda axial y alineada transversalmente al eje longitudinal para medir la deformación de Poisson (Fig. 2c). El resultado, de nuevo, es la compensación de la salida térmica, acompañada por una señal de salida amplificada [por el factor $(1+\nu)$ en este caso]. Se debería tener en mente en esta aplicación, sin embargo, que la precisión de la medida de deformación depende de algún modo de la precisión con la cual se conoce el coeficiente de Poisson del material a ensayar. El porcentaje de error en la medida de deformación es aproximadamente igual a $\nu/(1+\nu)$ veces el porcentaje de error en el coeficiente de Poisson. Otra precaución es necesaria cuando se montan las bandas extensométricas transversalmente en barras de pequeño diámetro (o, también, en filetes o agujeros de pequeño radio). Hines ha demostrado (ver el Apéndice) que bajo estas condiciones las características de la salida térmica de una banda extensométrica son distintas que cuando se monta la banda en una superficie lisa del mismo material.

En todas las aplicaciones que conllevan el automontaje de la banda de compensación en el elemento a ensayar, *la relación entre las deformaciones en las dos posiciones se debe conocer con certeza*. En una viga, por ejemplo, no debe haber ninguna carga axial o torsional indeterminada; y la barra a torsión no debe estar sujeta a cargas axiales o a flexión indeterminadas. Este requerimiento de un conocimiento exacto a priori de la distribución de deformación sitúa a estas y a la mayoría de aplicaciones similares en la clase de los transductores. Y se emplea universalmente el mismo método de compensación en los transductores comerciales de banda extensométrica. Tales transductores, sin embargo, utilizan circuitos de puente completo normalmente y disposiciones especiales de las bandas extensométricas para eliminar los efectos de fuerzas o momentos extraños.

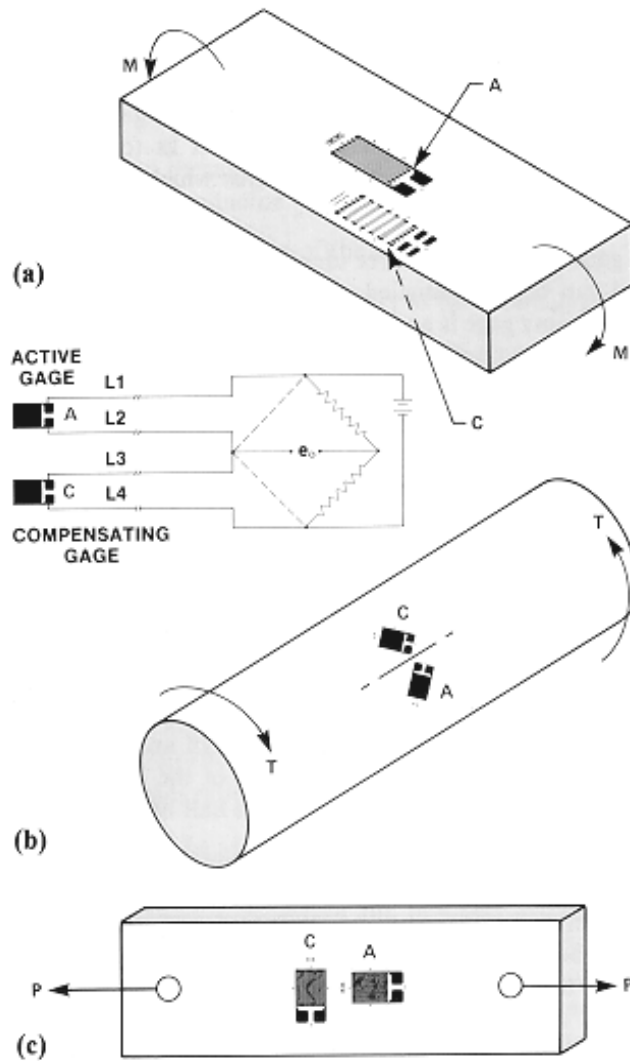


Fig. 2

7.2.1.2. Bandas Extensométricas Autocompensadas con la Temperatura

Las propiedades metalúrgicas de ciertas aleaciones de bandas extensométricas –en particular, Constantan y Karma (aleaciones A y K, respectivamente) – son tales que estas aleaciones pueden ser procesadas para minimizar la salida térmica en un amplio rango de temperatura cuando se unen a los materiales a ensayar con coeficientes de expansión térmica para los cuales han sido pensados. A las bandas extensométricas que usan estas aleaciones especialmente procesadas se consultan como *autocompensadas con la temperatura*.

Con la llegada de la banda extensométrica autocompensada con la temperatura, el requerimiento de una banda de compensación unida sin deformación a la rama adyacente del puente de Wheatstone se ha restringido considerablemente. Actualmente es una práctica normal cuando se hacen medidas de deformación a una temperatura cercana a la temperatura ambiente, usar una única banda autocompensada con la temperatura en una configuración de cuarto de puente

(con una conexión de tres hilos), completando el circuito de puente con una resistencia fija estable en la rama adyacente (Fig. 3). Tales resistencias "en configuración de puente", con coeficientes de resistencia a la temperatura muy bajo, se incorporan en la mayoría de indicadores de deformación modernos.

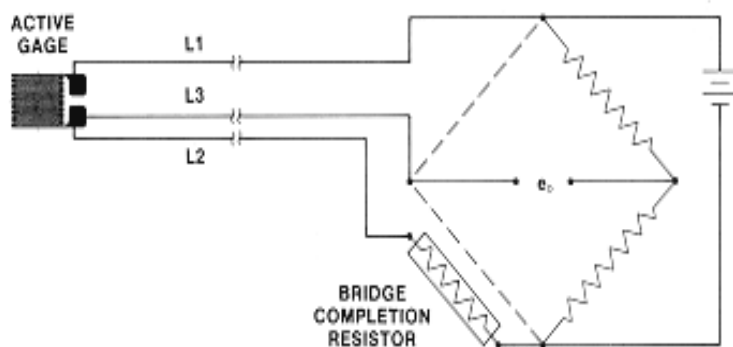


Fig. 3

La Figura 4 ilustra las características de la salida térmica de las bandas extensométricas típicas autocompensadas con la temperatura de aleación A y K. Como se demuestra en la figura, las bandas se diseñan para minimizar la salida térmica sobre el rango de temperatura de aproximadamente -20° a $+205^{\circ}$ C.

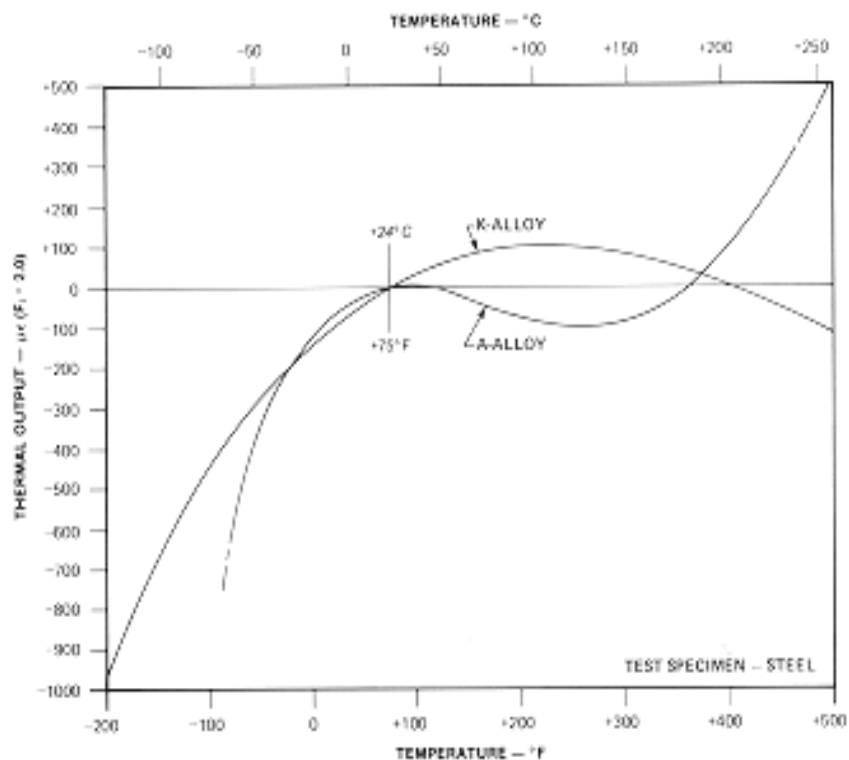


Fig. 4

Cuando se adhiere la banda extensométrica autocompensada con la temperatura a un material que tiene el coeficiente de expansión térmica para el cual está pensada la banda, y cuando se opera en el rango de temperatura de compensación efectiva, las medidas de deformación se pueden realizar con frecuencia sin la necesidad de corregir la salida térmica. Si se necesita corregir la salida térmica, se puede realizar según se muestra en las secciones siguientes.

Las bandas extensométricas autocompensadas con la temperatura se pueden usar además en la forma descrita anteriormente. Esto es, cuando las circunstancias son tales que se pueden usar un par de bandas adheridas a las ramas adyacentes del circuito de puente, con ambas bandas sometidas a la misma temperatura, y con una de las bandas sin deformación (o deformadas con una relación determinada a la otra banda), se puede conseguir una compensación de la temperatura excelente sobre un amplio rango de temperatura.

Las designaciones de bandas extensométricas autocompensadas con la incluyen un número que identifica el coeficiente de expansión térmica (en ppm/°F) del material en el cual la banda presentará las características de la salida térmica que se muestran en la Figura 4. Por ejemplo, las bandas de aleación Constantan de Micro-Measurements están disponibles en los siguientes números A-C-T: 00, 03, 05, 09, 13, 15, 18, 30, 40 y 50. Los números A-C-T de 30 y superiores están pensados para uso en plásticos. En la aleación K, el rango de números A-C-T está más limitado, y consiste en 00, 03, 05, 06, 09, 13 y 15. Por conveniencia para referencia, la Tabla 1 da un listado de un número de materiales comunes, y da los valores nominales del coeficiente de expansión térmica en grados Centígrados para cada uno, junto con el número A-C-T que se seleccionaría normalmente para medidas de deformación en ese material. La tabla además identifica aquellos materiales a ensayar usados en la determinación de las curvas de salida térmica publicadas para las bandas extensométricas autocompensadas con la temperatura de Micro-Measurements.

Si se instala una banda extensométrica con un número A-C-T particular en un material con un coeficiente de expansión de separación, las características de salida térmica serán alteradas de aquellas que se muestran en la Figura 4 mediante una rotación general de la curva alrededor del punto de referencia de la temperatura ambiente. Cuando el número A-C-T es inferior al coeficiente de expansión del material, la rotación es en el sentido contrario a las agujas del reloj; y cuando es superior, en el sentido de las agujas del reloj. La rotación de la curva de la salida térmica mediante la desunión intencionada del número A-C-T y del coeficiente de expansión se puede usar a través de las características de la salida térmica a favor de un rango de temperatura de funcionamiento particular.

Material	Coefficiente de Expansión	N° A-C-T Recomendado
	Por °C	
ALÚMINA, COCIDA	5,4 x 10 ⁻⁶	03
ALUMINIO, 2024-T4*, 7075-T6	23,2	13*
BERILIO	11,5	06
BERILIO COBRE 25	16,7	09
LATÓN, 30-70	20,0	13
BRONZE, FÓSFORO(10%)	18,4	09
COBRE	16,7	09
VIDRIO, CAL DE SOSA	9,2	05
INCONEL, FORJADO	12,6	06
INCONEL X	12,1	06
INVAR	1,4	00
HIERRO, COLADA GRIS	10,8	06
MAGNESIO, AZ-31B*	26,1	15*
MOLIBDENO	4,0	03*
MONEL	13,5	06
NIQUEL A	11,9	06

CUARZO, FUNDIDO	0,5	00
ACERO, 1008, 1018*	12,1	06*
ACERO, 4340	11,3	06
ACERO, 17-4 PH	10,8	06
ACERO, 17-7	10,3	06
ACERO, 15-7 MO.PH	9,0	05
ACERO INOXIDABLE 304*	17,3	09*
ACERO INOXIDABLE 310	14,4	09
ACERO INOXIDABLE 316	16,0	09
ACERO INOXIDABLE 410	9,9	05
ESTAÑO, PURO	23,4	13
TITANIO, PURO	8,6	05
TITANIO*, 6AL-4V	8,8	05*
SILICATO DE TITANIO*	0,03	00*
TUNGSTENO	4,3	03
ZIRCONIO	5,6	03

**Indica el tipo de material usado en la determinación de las curvas de la salida térmica.*

7.2.2. Corrección de la Salida Térmica

Dependiendo de la temperatura de ensayo y del grado de precisión requerido en la medida de deformación, a veces será necesario realizar correcciones de la salida térmica, incluso aunque se usen bandas autocompensadas con la temperatura. En cualquier caso, cuando se realizan medidas de deformación a una temperatura distinta de la temperatura de equilibrio del instrumento, la deformación indicada es igual a la suma de la deformación inducida por tensión en el objeto a ensayar y la salida térmica de la banda (mas la deformación equivalente de otros cambios de resistencia en el circuito de la banda). Con la salida térmica expresada en unidades de deformación, como en la Ec. (2), la corrección de este efecto se realiza simplemente substrayendo (algebraicamente, con signo) la salida térmica de la deformación indicada.

Como ayuda para el usuario en la corrección de las propiedades dependientes de la temperatura, la hoja de datos técnica de cada paquete de bandas extensométricas de aleación A y K incluye un gráfico que muestra la variación de la salida térmica y del factor de banda con la temperatura. La Figura 5 es típica (para la aleación A) de los gráficos suministrados con las bandas. Además de los gráficos de la variación de la salida térmica y del factor de banda, se proveen las ecuaciones polinómicas (en grados Fahrenheit y Centígrados) de la curva de la salida térmica. Además se dan otros dos puntos de información: (1) el número de lote de las bandas extensométricas, y (2) el material a ensayar usado en la medida de las características de la salida térmica. Se debería destacar que los datos de la salida térmica son específicamente aplicables únicamente a las bandas del número de lote designado, aplicadas al mismo material a ensayar.

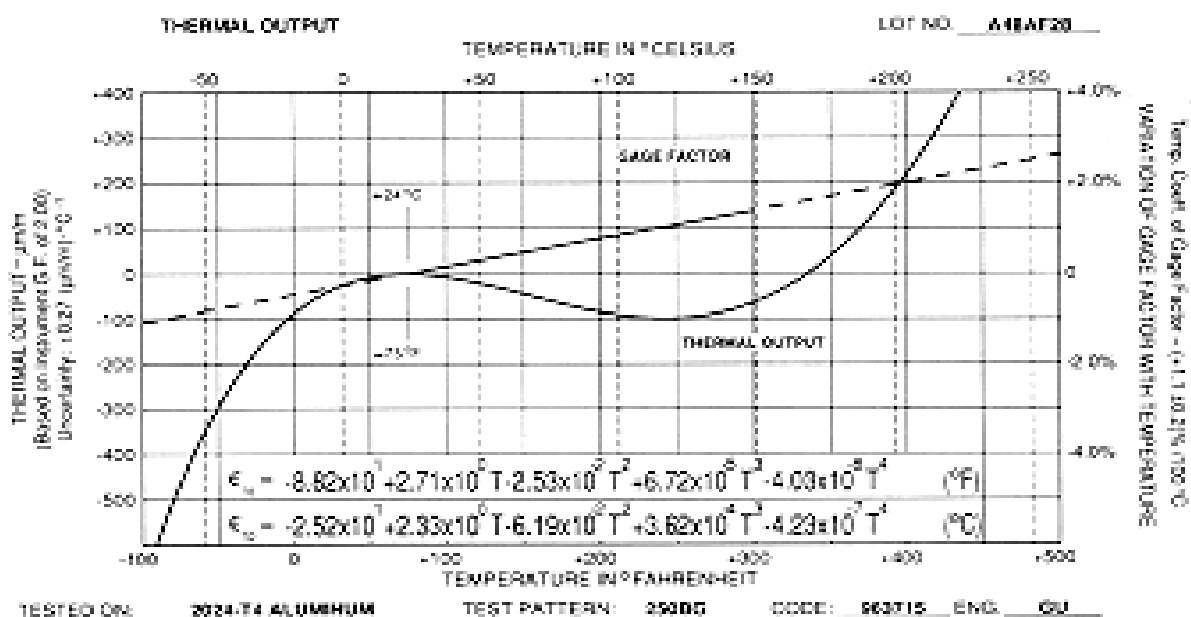


Fig. 5

7.2.2.1. Procedimiento Simple

La corrección aproximada de la salida térmica puede ser conseguida más directamente y fácilmente usando el gráfico (Fig. 5) suministrado en cada paquete de bandas autocompensadas con la temperatura. Este método simple de corrección está basado en el hecho de que los factores de banda de las bandas de aleación A y K están cerca de 2,0, lo cual es el ajuste del factor de banda estandarizado usado en la calibración de las bandas de la salida térmica. El ajuste de los datos de la salida térmica para un ajuste del factor de banda de un instrumento diferente se describe posteriormente.

El primer paso en el procedimiento de operación es referirse al gráfico y leer la salida térmica correspondiente a la temperatura de ensayo. Luego, suponiendo que el indicador de deformación fue equilibrado a deformación cero a temperatura ambiente (la temperatura de referencia con respecto a la cual fueron medidos los datos de la salida térmica), reste la salida térmica dada en el gráfico de las medidas de deformación a la temperatura de ensayo, *acarreando todos los signos*. Este procedimiento se puede expresar analíticamente como sigue:

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\tilde{\epsilon}} - \epsilon_{T/O} \quad (3)$$

donde:

$\tilde{\tilde{\epsilon}} =$
medida de deformación incorrecta, según se registró en el indicador de deformación.

$\tilde{\epsilon} =$
indicación de deformación parcialmente corregida de la salida térmica, pero no para una variación del factor de banda con la temperatura.

$\epsilon_{T/O} =$
salida térmica, en unidades de deformación, de la hoja de datos técnica del paquete.

Como ejemplo, suponga que, con el elemento a ensayar descargado y a temperatura ambiente, el indicador de deformación fue equilibrado para deformación nula. A la temperatura de ensayo de +121° C, la deformación indicada es de +2300µε. Si se refiere a la Fig. 5, suponiendo que el gráfico es el del paquete de la banda, la salida térmica a la temperatura de ensayo es de -100µε. De la Ec. (3), la deformación corregida es por tanto de 2300 - (-100) = 2400µε. Si la deformación indicada hubiese sido negativa, la deformación corregida sería: -2300 - (-100) = -2200µε. Si el instrumento fuera equilibrado para deformación nula a cualquier temperatura distinta de +24° C, el valor de $\epsilon_{T/O}$ a usar en la Ec. (3) es el cambio neto en la salida térmica que va de la

temperatura de equilibrio a la temperatura de ensayo. Esto es, $\varepsilon_{T/O} = \varepsilon_{T/O}(T_2) - \varepsilon_{T/O}(T_1)$, acarreado el signo de la salida térmica en cada caso.

7.2.2.2. Ajuste de la Salida Térmica para el Factor de Banda

Se debería destacar que el ajuste del factor de banda usado en la grabación de los datos de la salida térmica está estandarizado en 2,0 para todas las bandas de aleación A y K. Si durante la medida de deformación, el instrumento del usuario se ajusta a un factor de banda distinto de 2,0, la componente de la salida térmica de la deformación indicada diferirá de acuerdo a la Fig. 5. Esta diferencia no es normalmente mayor que el porcentaje respectivo cuando el factor de banda del instrumento esta ajustado al que corresponde a la banda de aleación A o K. Una pequeña mejora en la precisión de la corrección de la salida térmica puede ser realizada ajustando los datos de la Fig. 5 (tomados para $F_I = 2,0$) al ajuste del factor de banda corriente del instrumento. Esto se realiza como sigue:

$$\varepsilon'_{T/O} = \varepsilon_{T/O} \frac{2,0}{F_I} \quad (4)$$

donde: $\varepsilon'_{T/O}$ = salida térmica ajustada al ajuste del factor de banda del instrumento.

$\varepsilon_{T/O}$ = salida térmica de la hoja técnica de datos del paquete de la banda ($F_I = 2,0$).

F_I = ajuste del factor de banda del instrumento durante la medida de deformación.

Continuando con el ejemplo numérico, y asumiendo que la hoja de datos da un factor de banda de 2,10 para la banda, la salida térmica ajustada se calcula de la Ec. (4):

$$\varepsilon'_{T/O} = -100 \cdot \frac{2,0}{2,1} = -95 \mu\varepsilon$$

Y las medidas de deformación corregidas se convierten en:

$$2300 - (-95) = 2395 \mu\varepsilon$$

y,

$$-2300 - (-95) = -2205 \mu\varepsilon$$

Según se muestra en la Fig. 5, el factor de banda de la banda extensométrica varía suavemente con la temperatura. Cuando este efecto es significativamente relativo a la precisión requerida en la medida de deformación, el factor de banda de la banda extensométrica se puede corregir a su valor de temperatura de ensayo, y el factor de banda del instrumento ser corregido por consiguiente. El factor de banda del instrumento resultante se sustituye en la Ec. (4) para obtener la salida térmica ajustada, la cual es entonces restada algebraicamente de la deformación indicada para producir la deformación inducida por tensión.

7.2.2.3. Adquisición de Datos Extensiva

Si se desea, para programas de medida de deformación extensivos, la curva de la salida térmica de la Fig. 5 se puede redibujar con el ajuste del factor de banda – o a la temperatura ambiente o a la temperatura de ensayo – ya incorporado. Una vez terminado, la salida térmica leída de la curva redibujada se puede usar directamente para corregir la deformación indicada. Este procedimiento puede merecer la pena si se van a tomar un gran número de lecturas de deformación con una banda o con un grupo de bandas del mismo lote.

Por conveniencia en la corrección computerizada de la salida térmica, Micro-Measurements provee, para cada lote de bandas de aleación A y K, una ecuación polinómica ajustada por regresión (mínimos cuadrados) que representa la curva de la salida térmica para ese lote. El polinomio tiene la forma siguiente:

$$\varepsilon_{T/O} = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3 + A_4T^4 \quad (5)$$

donde: T = temperatura.

Si no se incluye directamente en el gráfico, según se muestra en la Fig. 5, los coeficientes A_i de la Ec. (5) se pueden obtener a petición a Micro-Measurements especificando el número de lote.

Se debería tener en mente que las ecuaciones ajustadas por regresión, al igual que los datos de los cuales estas se derivan, están basados en un factor de banda del instrumento de 2,0; y, para la mayor precisión, los valores de salida térmica calculados de las ecuaciones se deben ajustar al ajuste del factor de banda del instrumento si es diferente de 2,0. Como alternativa, los coeficientes A_i de la Ec. (5) se pueden multiplicar por la relación $2,0/F_I$, donde F_I es el factor de banda del instrumento usado para la medida de deformación. Otra consideración que no debería ser pasada por alto es que los datos de la salida térmica suministrada y las ecuaciones son aplicables

únicamente al lote especificado de bandas, adheridas al material idéntico en el funcionamiento de los ensayos de la salida térmica.

7.2.2.4. Precisión y Práctica – Medida Directa de la Salida Térmica.

Existe un límite para saber hasta cuándo es práctico ir ajustando los datos de la salida térmica del fabricante en un intento para obtener mayor precisión. En primer lugar, la curva de la salida térmica provista en la hoja técnica de datos (o mediante la ecuación polinómica) representa una media, ya que existe alguna variación en las características de la salida térmica de banda a banda procedentes del mismo lote. Y la anchura de la banda de dispersión es aproximadamente lineal con la desviación de la temperatura ambiente, al menos sobre el rango de temperatura de 0° a +175° C para el cual los datos de dispersión son disponibles. A un nivel de confianza de 2σ (95%), la variabilidad de la aleación A se puede expresar como $\pm 0,27\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$, y la de la aleación K como $\pm 0,45\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$. Por tanto, a la temperatura de ensayo de +135° C, el ancho 2σ de la banda de dispersión es de $\pm 30\mu\epsilon$ para la aleación A, y $\pm 50\mu\epsilon$ para la aleación K.

Además, los datos de la salida térmica dados en el paquete de la banda fueron necesariamente medidos en un lote particular de un material a ensayar particular (véase la Tabla 1). Diferentes materiales con el mismo o con los mismo o muy similares coeficientes de expansión, e incluso distintos lotes y formas del mismo material, pueden tener características de expansión térmica significativamente diferentes.

De las consideraciones anteriores, debería ser evidente que para conseguir la mayor corrección precisa de la salida térmica es generalmente necesario obtener los datos de la salida térmica con la banda de ensayo verdadera en el elemento a ensayar verdadero. Para este propósito, un termopar o sensor de resistencia a la temperatura se instala inmediatamente adyacente a la banda extensométrica. La banda es entonces conectada al indicador de deformación y, sin cargas aplicadas al elemento a ensayar, el instrumento es equilibrado a deformación nula. Posteriormente, el elemento a ensayar está sometido a la temperatura(s) de ensayo, de nuevo sin cargas aplicadas, y la temperatura y la deformación indicada se graban bajo condiciones *de equilibrio*. Si, a través de este proceso, el elemento está completamente libre de tensiones mecánicas y *térmicas*, la indicación de deformación resultante a cualquier temperatura es la salida térmica a esa temperatura. Si el ajuste del factor de banda del instrumento durante la medida de deformación posterior es la misma que la usada en la calibración de la salida térmica, la salida térmica observada a cualquier temperatura se puede restar algebraicamente de la deformación indicada para conseguir la deformación corregida. De otra forma, los datos de la salida térmica se deberían ajustar mediante la diferencia de los ajustes del factor de banda, según se describe posteriormente, anterior a la resta.

Para conseguir corregir la salida térmica en la forma descrita aquí, es necesario, por supuesto, medir la temperatura en la instalación de la banda extensométrica cada vez que se realice una medida de deformación. La principal desventaja de este procedimiento es que dos canales de instrumentación se adelantan a cada banda extensométrica – una para la banda de deformación propiamente dicha, y una para el termopar o sensor de resistencia a la temperatura.

7.2.2.5. Desequilibrio del A-C-T (S-T-C)

Cuando se va a usar una banda extensométrica en un material diferente que el usado en la obtención de los datos de la salida térmica del fabricante, ocurre un desequilibrio del A-C-T. En tales casos, la salida térmica de la banda diferirá de la curva suministrada en el paquete de la banda. Considere, por ejemplo, las medidas de deformación realizadas a una temperatura elevada en el Monel con una banda de deformación de número A-C-T 06, calibrado para una salida térmica en acero 1018 (Tabla 1). Las características de expansión térmica del Monel son algo diferentes de las del acero 1018, y la banda extensométrica producirá una salida térmica diferente en consecuencia. Por tanto, si se requiere una medida de deformación precisa, las características de la salida térmica de la banda adherida al Monel deben ser medidas sobre el rango de temperatura de ensayo según se describe posteriormente para excursiones pequeñas de la temperatura respecto de la temperatura ambiente, el efecto de la diferencia en las propiedades de expansión entre el Monel y el acero 1018 no es muy significativa, y sería comúnmente ignorada.

Por otro lado, cuando la diferencia en las propiedades de expansión térmica entre el material de calibración de la salida térmica y el material al cual la banda está adherida para el análisis de tensión es grande, la curva de la salida térmica publicada no se puede usar directamente realizando correcciones. Ejemplos de esto ocurren en bandas extensométricas de Constantan con números A-C-T de 30, 40 y 50. La aplicación principal de estas bandas será normalmente la medida de deformación en plásticos de elevados coeficientes de expansión. Pero las propiedades térmicas (y otras) de los plásticos varían significativamente de lote a lote y, a causa de las diferencias en la formulación, incluso más seriamente de fabricante a fabricante del mismo plástico nominalmente. Este hecho, junto con la inestabilidad en general de las propiedades de los plásticos con el tiempo, la temperatura, la humedad, etc., crea una situación en la cual no existen materiales plásticos adecuados para uso en la medida directa de las características de la salida térmica de las bandas con números A-C-T de 30 y superiores. Como alternativa admisible pero menos satisfactoria, los datos de la salida térmica provistos con estas bandas se miden en especímenes de acero 1018 a causa de la estabilidad y repetibilidad de este material.

Como resultado de lo anterior, es siempre preferible al medir deformaciones en plásticos u otros materiales con bandas con A-C-T de 30, 40 o 50 (a temperaturas diferentes de la temperatura de equilibrio del instrumento) para determinar primero experimentalmente la salida térmica de la

banda del material a ensayar. Usando estos datos, las correcciones se realizan entonces normalmente restando algebraicamente la salida térmica de la deformación medida.

Para uso como una rápida primera aproximación, las características de la salida térmica de bandas con A-C-T de 30, 40 o 50 en un plástico (o cualquier otro material) de coeficiente de expansión conocido se pueden estimar invirtiendo la rotación en el sentido de las agujas del reloj de la curva de la salida térmica la cual ocurrió cuando al medir las características en un espécimen de acero. Suponga, por ejemplo, que una banda de A-C-T 30 se va a usar para medidas de deformación en un plástico con un coeficiente de expansión constante de $12,1 \times 10^{-6}/^{\circ} \text{C}$ sobre el rango de temperatura de ensayo. Con el indicador de deformación ajustado al factor de banda de la banda extensométrica, por tanto $F_I = F_G$, y destacando que el coeficiente $(1+K_I)/(1-\nu_0 K_I)$ está normalmente cercano a la unidad para las bandas de aleación A, la Ec. (2) puede ser reescrita de forma simplificada (y aproximada) como sigue:

$$\varepsilon_{T/O} = \left(\frac{\beta_G}{F_G} - \alpha_G \right) \Delta T + \alpha_s \Delta T \quad (6)$$

(Nota: Aunque el residuo de este ejemplo se acarrea sólo en el sistema en grados Fahrenheit para evitar complicar la notación, el mismo procedimiento produce el resultado equivalente en el sistema en grados Centígrados).

Al aplicar específicamente a los materiales 6,7 y $35 \times 10^{-6}/^{\circ} \text{F}$, la Ec. (6) se convierte en:

y,

$$\varepsilon_{T/O(6,7)} = \left(\frac{\beta_G}{F_G} - \alpha_G \right) \Delta T + 6,7 \Delta T \quad (7a)$$

y,

$$\varepsilon_{T/O(35)} = \left(\frac{\beta_G}{F_G} - \alpha_G \right) \Delta T + 35 \Delta T \quad (7b)$$

Resolviendo la Ec. (7a) para $((\beta_G/F_G)-\alpha_G)\Delta T$, y sustituyendo en la Ec. (7b),

$$\varepsilon_{T/O(35)} = \varepsilon_{T/O(6,7)} + (35 - 6,7)\Delta T \quad (8)$$

En palabras, la Ec. (8) expone que la curva de la salida térmica para una banda con un A-C-T 30 montada en acero 1018 se puede convertir a aquella para la misma banda montada en un plástico $35 \times 10^{-6}/^\circ\text{F}$ añadiendo a la curva original el producto de la diferencia en los coeficientes de expansión y la desviación de la temperatura (*siempre acarreado el signo adecuado para la desviación de la temperatura*). La figura 6 muestra la curva de la salida térmica para una banda con un A-C-T 30 según se midió originalmente en un espécimen de acero 1018, y según se giró en el sentido contrario a las agujas del reloj para aproximar la respuesta en un plástico con un coeficiente de expansión de $35 \times 10^{-6}/^\circ\text{F}$.

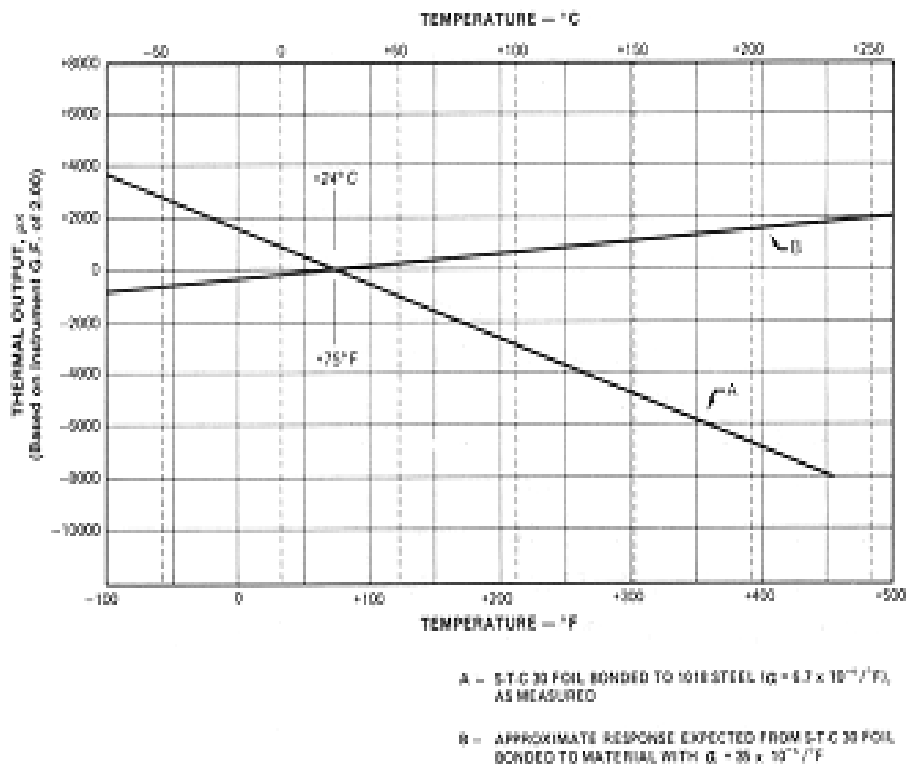


Fig. 6

El procedimiento recientemente demostrado es bastante general, y se puede usar para predecir el efecto aproximado de cualquier desequilibrio entre el coeficiente de expansión usado para obtener la curva de la salida térmica en la hoja técnica de datos del paquete de la banda y el coeficiente de expansión de algún otro material en el cual se va a instalar la banda. Aunque en general es aplicable, el procedimiento está limitado en precisión porque los coeficientes de la expansión de la Ec. (6) son funciones por sí mismas de la temperatura para la mayoría de

materiales. Una limitación adicional en precisión puede ocurrir al medir deformaciones en plásticos u otros materiales con pobres características de transferencia de calor. Si, debido al calor generado, la temperatura de la banda extensométrica es significativamente mayor que la del elemento a ensayar, los datos de la salida térmica suministrados en el paquete de la banda no se pueden aplicar con significativamente.

Se debería tener en mente que el procedimiento precedente da, a lo más, una aproximación imprecisa de la salida térmica verdadera cuando existe un desequilibrio entre el coeficiente de expansión del material a ensayar y el número A-C-T elegido de la banda extensométrica. Cuando se requiere una aproximación precisa de la salida térmica, la medida directa es altamente recomendable.

7.3. Variación del Factor de Banda con la Temperatura

Las aleaciones usadas en las bandas extensométricas resistivas típicamente presentan un cambio en el factor de banda con la temperatura. En algunos casos, el error debido a este efecto es pequeño y se puede ignorar. En otros, dependiendo de la aleación que intervenga, la temperatura de ensayo, y la precisión requerida en la medida de la deformación, la corrección de la variación del factor de banda puede ser necesaria.

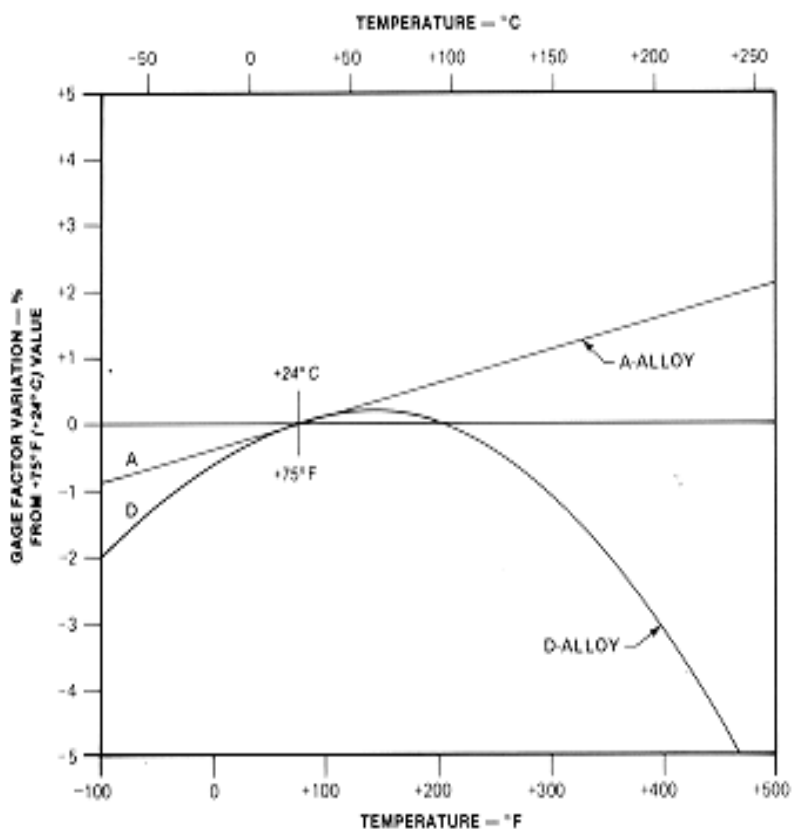


Fig. 7

La figura 7 muestra la variación del factor de banda con la temperatura para el Constantan e isoelástico (aleación A y D respectivamente). Se puede observar en el gráfico que el efecto en la aleación A es esencialmente lineal, y bastante pequeño a cualquier temperatura, siendo típicamente del orden del 2% o menor para 100° C. Por tanto, para un rango de temperatura de, digamos, $\pm 50^\circ$ C, alrededor de la temperatura ambiente, la corrección puede no ser necesaria. A temperaturas más extremas, cuando se justifique por requerimientos de precisión, la corrección se puede realizar según se muestra en la **sección 7.3.1**, o combinada con la corrección de la salida térmica según la **sección 7.4**.

La variación del factor de banda en la aleación D mientras esté entre la temperatura ambiente y $+90^\circ$ C, se ve influenciado suavemente fuera de este rango. Sin embargo, incluso para una temperatura donde la desviación del factor de banda tiene un porcentaje elevado, la corrección puede no ser práctica. Esto es porque la aleación D se usa fundamentalmente para la medida de deformación dinámica pura, bajo tales condiciones otros errores en el sistema de medida pueden empequeñecer el efecto del factor de banda.

Como se muestra en la Fig. 8, la variación del factor de banda con la temperatura para el Karma (aleación K) es diferente claramente del de las aleaciones A y D. La variación del factor de banda es aproximadamente lineal con la temperatura, como lo es para la aleación A, pero la pendiente es negativa y es una función del número A-C-T, haciéndose más elevada con números mayores.

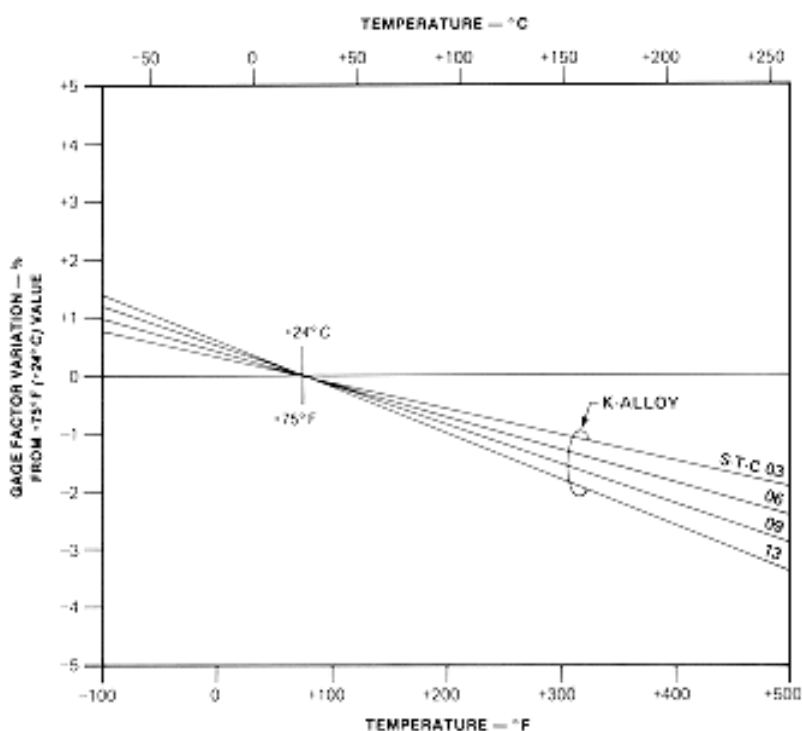


Fig. 8

7.3.1. Medidas de Deformación Corregidas para una Variación del Factor de Banda con la temperatura

El procedimiento estándar para la medida del factor de banda de un lote de cualquier tipo particular de banda extensométrica es desarrollado a la temperatura ambiente. Es este valor del factor de banda, junto con su tolerancia, la cual es dada en la hoja de datos técnica en cada paquete de bandas. Por tanto, a cualquier otra temperatura distinta de la temperatura ambiente el factor de banda es diferente, y puede ser necesario una corrección, según las circunstancias. Además el gráfico aplicable de la variación del factor de banda con la temperatura dado en cada hoja de datos, tales como aquellos en las Figs. 7 y 8. Esta información es todo lo que se requiere para realizar la corrección.

En general, cualquier dato de medida de deformación se puede corregir (o ajustar) de un factor de banda a otro con una relación muy simple. Suponga, por ejemplo, que una deformación, ε_1 , fue registrada con el ajuste del factor de banda del indicador de deformación en F_1 , y es deseable corregir los datos para un factor de banda de F_2 . La deformación corregida, ε_2 , se calcula así:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cdot \frac{F_1}{F_2} \quad (9)$$

Al corregir la variación del factor de banda con la temperatura, F_1 se puede tomar como el factor de banda a la temperatura ambiente con los datos del paquete al cual puede haber sido instalado el indicador de deformación, y F_2 el factor de banda a la temperatura de ensayo. Por supuesto, cuando la temperatura de ensayo es conocida con precisión razonable por adelantado, el control del factor de banda del indicador de deformación se puede ajustar a F_2 , inicialmente, y no es necesaria corrección alguna. Se debería destacar en este caso, sin embargo, que si las correcciones de la salida térmica se van a realizar del gráfico (o ecuación polinómica) de la hoja de datos técnica en el paquete de la banda, los datos de la salida térmica se deben ajustar desde un factor de banda de 2,0 (al cual la salida térmica fue medida) hasta el factor de banda de ensayo, F_2 , siendo usado para la medida de deformación.

La siguiente relación se usa para determinar el factor de banda a la temperatura de ensayo de los datos tabulares y gráficos suministrados en el paquete de la banda:

$$F_2 = F_1 \left(1 + \frac{\Delta F(\%)}{100} \right) \quad (10)$$

donde: $\Delta F(\%)$ = variación porcentual del factor de banda con la temperatura según se muestra en las Figs. 7 y 8. (Nota: El signo de la variación debe ser incluido siempre).

Como ejemplo numérico, usando las Ecs. (9) y (10), suponga que el factor de banda a la temperatura ambiente con un A-C-T 13, la banda de aleación K es de 2,05 y, con el instrumento ajustado a este valor, la indicación de deformación a +230° C es de 1820 $\mu\epsilon$. Refiriéndose a la Fig. 8, $\Delta F(\%)$ para este caso es de -3, y, de la Ec. (10),

$$F_2 = 2,05 (1 - 0,03) = 1,99$$

Substituyendo en la Ec. (9),

$$\epsilon_2 = 1820 \frac{2,05}{1,99} = 1875 \mu\epsilon$$

Ya que la variación del factor de banda con la temperatura afecta tanto a la salida térmica como a la deformación inducida por tensión, y ya que la confusión puede aumentar al realizar las correcciones individualmente y entonces combinarse entre ellas, la siguiente sección proporciona las ecuaciones para desarrollar ambas correcciones simultáneamente.

7.4. Corrección Simultánea de los Errores de la Salida Térmica y del Factor de Banda

En esta sección se dan las relaciones para corregir las deformaciones indicadas de la variación de la salida térmica y del factor de banda con la temperatura. Las formas que estas relaciones pueden tomar dependen de las circunstancias de medida – fundamentalmente del ajuste del factor de banda del indicador de deformación y de la temperatura a la cual se va a equilibrar el instrumento a deformación nula.

El factor de banda del indicador de deformación se puede ajustar a cualquier valor con su rango de control, pero uno de los siguientes tres es el más probable. (El ajuste del factor de banda no se debería cambiar durante un ensayo (después del balance-nulo), ya que esto podría introducir una deriva del cero.)

1. El factor de banda, F^* , usado en la determinación de los datos de la salida térmica ($F^* = 2,0$)
2. El factor de banda a la temperatura ambiente según se da en la hoja de datos técnica del paquete de la banda.
3. El factor de banda de la banda a la temperatura de ensayo o cualquier otra temperatura distinta de la temperatura ambiente o de ensayo.

Ningún factor de banda es correcto únicamente para esta situación; pero, de lo anterior, se descubre que el seleccionar la primera alternativa generalmente conduce a la forma de la expresión de la corrección más simple. A causa de esto, el procedimiento desarrollado aquí requiere que el factor de banda del instrumento se ajuste a $F_I = F^* = 2,0$, el factor de banda al cual los datos de la salida térmica fueron grabados.

De modo parecido, el indicador de deformación se puede equilibrar a deformación nula a cualquiera de las variadas temperaturas de banda extensométrica:

1. Temperatura ambiente.
2. Temperatura de ensayo.
3. Temperatura arbitraria distinta de la temperatura ambiente o de ensayo.

La segunda y tercera de las elecciones anteriores se pueden usar para medidas de deformación significativas únicamente cuando el objeto de ensayo es conocido para estar completamente libre de tensiones mecánicas o térmicas a la temperatura de equilibrio. Ya que este requerimiento es normalmente difícil o imposible de satisfacer, la primera alternativa es generalmente preferible, y es por tanto elegido del siguiente procedimiento.

Como ejemplo, suponga que el indicador de deformación está equilibrado con la banda a la temperatura ambiente, y con el control del factor de banda ajustado a F^* , el valor en la grabación de los datos de la salida térmica. Suponga además que una deformación $\varepsilon_{1\approx}$ es posteriormente indicada a una temperatura T_I la cual es diferente de la temperatura ambiente. La deformación indicada $\varepsilon_{1\approx}$ tiene generalmente error debido tanto a la salida térmica como a la variación del factor de banda con la temperatura – y por lo tanto la doble tilde sobre el símbolo de la deformación.

Considere primero la corrección de la salida térmica. Ya que el ajuste del factor de banda del indicador de deformación coincide con aquel usado en la medida de la salida térmica, esta corrección se puede realizar mediante la resta directa de la salida térmica (dada en hoja de datos técnica del paquete de la banda) de la deformación indicada. Esto es,

$$\tilde{\varepsilon}_1 = \tilde{\tilde{\varepsilon}}_1 - \varepsilon_{T/O}(T_1)$$

donde: $\varepsilon_{1\approx}$ = deformación indicada, salida

térmica y variación del factor de banda con la temperatura sin corregir.

$\varepsilon_1\tilde{\sim}$ = deformación semicorregida; por

ejemplo, corregida sólo la salida térmica.

$\varepsilon_{T/O}(T_1)$ = salida térmica a la temperatura T_I

(la notación funcional se usa para evitar los subíndices dobles y triples).

A continuación, la corrección se realiza para la variación del factor de banda con la temperatura. Ya que la medida de deformación se realizó a un ajuste del factor de banda de F^* , la corrección al factor de banda de la temperatura de ensayo se desarrolla con la Ec. (9) como sigue:

$$\varepsilon_1 = \tilde{\varepsilon}_1 \frac{F^*}{F(T_1)}$$

donde: ε_1 = magnitud de deformación corregida, tanto para la salida térmica como para la variación del factor de banda con la temperatura.

$F(T_1)$ = factor de banda a la temperatura de ensayo.

Combinando las dos correcciones,

$$\varepsilon_1 = \left[\tilde{\varepsilon}_1 - \varepsilon_{T/O}(T_1) \right] \frac{F^*}{F(T_1)} \quad (11)$$

Cuando las condiciones prescritas del ajuste del factor de banda y de la temperatura de equilibrio nulo se encuentran, la deformación ε_1 de la Ec.(11) es la deformación verdadera inducida por tensiones mecánicas y/o térmicas en el objeto a ensayar a la temperatura de ensayo. Como ejemplo numérico de aplicación de la Ec. 11), suponga lo siguiente:

Banda extensométrica	WK-06-250BG-350
Material de ensayo	Acero
Factor de banda a la temperatura ambiente, F_0	2,07
Temperatura de ensayo	-45° C
$\varepsilon_1 \approx$, deformación indicada a la temperatura de ensayo (con el factor de banda del instrumento ajustado a F^*)	-1850 $\mu\varepsilon$
$\dagger \varepsilon_{T/O}(T_1)$, salida térmica a la temperatura de ensayo	-200 $\mu\varepsilon$
$\dagger \Delta F(T_1)$, desviación a la temperatura de ensayo	+0,6%

Usando la Ec. (10) para obtener $F(T_1)$, el factor de banda de la banda a la temperatura de ensayo,

$$F(T_1) = F_0 \left(1 + \frac{0,6}{100} \right) = 2,07 \cdot 1,006$$

$$F(T_1) = 2,08$$

Sustituyendo en la Ec. (11), con $F^* = 2,0$,

$$\varepsilon_1 = \left[-1850 - (-200) \right] \frac{2,0}{2,08} = -1587 \mu\varepsilon$$

Para lo que puede parecer ser un caso más complejo, considere un compresor centrífugo instrumentado con bandas extensométricas, operando primero a una velocidad N_1 , con la temperatura de la instalación de la banda a T_1 . Bajo estas condiciones, la deformación indicada es $\varepsilon_1 \approx$. La velocidad del compresor aumenta entonces a N_2 , con una temperatura resultante de instalación de la banda de T_2 y una deformación indicada $\varepsilon_2 \approx$. El ingeniero desea determinar el cambio en la deformación *inducido por tensión* causado por el aumento de la velocidad de N_1 a N_2 .

Este problema no es normalmente más difícil que el ejemplo anterior. Aplicando la Ec. (11) a cada condición:

$$\varepsilon_1 = \left[\tilde{\varepsilon}_1 - \varepsilon_{T/O}(T_1) \right] \frac{F^*}{F(T_1)}$$

$$\varepsilon_2 = \left[\tilde{\varepsilon}_2 - \varepsilon_{T/O}(T_2) \right] \frac{F^*}{F(T_2)}$$

El mismo procedimiento de sustitución numérica se sigue como antes, y los resultados restados para dar $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$, el cambio en la deformación inducida por tensión causado por un aumento de velocidad. La resta puede además ser realizada para conseguir una única ecuación para el cambio de deformación:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = F * \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_2 - \varepsilon_{T/O}(T_2)}{F(T_2)} - \frac{\tilde{\varepsilon}_1 - \varepsilon_{T/O}(T_1)}{F(T_1)} \right]$$

Cuando se usa reducción de datos computerizada, las expresiones analíticas de las funciones $\varepsilon_{T/O}(T)$ y $F(T)$ se pueden introducir en el programa para permitir el cálculo directo de las deformaciones corregidas a partir de las deformaciones indicadas.

APÉNDICE

Efectos de la Curvatura de la Superficie de la Salida Térmica

Frank F. Hines ha demostrado que cuando se instala una banda extensométrica en una superficie con curva brusca la salida térmica manifestada por dicha instalación es diferente de la que se obtendría de la misma banda montada sobre una superficie lisa. El *cambio* inducido por la curvatura de la salida térmica, referenciado aquí como salida térmica *incremental*, es debido al hecho de que la rejilla de la banda sensible a la deformación está por encima de la superficie del miembro a ensayar mediante el espesor del recubrimiento de la banda y la capa adhesiva. Se puede mostrar que bajo estas condiciones un cambio de la temperatura causa una deformación diferente en la rejilla que la que ocurriría con la rejilla adherida a una superficie plana. El resultado es una salida térmica alterada de los datos proporcionados en el paquete de la banda.

La salida térmica incremental inducida por la curvatura es un efecto de segundo orden que puede ser ignorado generalmente; pero se puede hacer significativo cuando el radio de curvatura es muy pequeño. Como regla a recordar, la salida térmica incremental puede ser omitida cuando el radio de curvatura es de 13 mm o mayor. Con radios más pequeños, la corrección puede ser necesaria, dependiendo de la precisión en la medida de deformación requerida.

Usando la misma aproximación básica y las aproximaciones usadas por Hines en su derivación, pero generalizando el tratamiento para permitir cualquier combinación de las propiedades del adhesivo y de la protección, se puede escribir una expresión para estimar la salida térmica incremental como sigue:

$$\Delta\varepsilon_{T/O} = \quad (A-1)$$
$$\frac{1}{R} \left[(1 + 2\nu_{A-B})(h_A\alpha_A + h_B\alpha_B) - 2\nu_{A-B}\alpha_S(h_A + h_B) \right] \Delta T$$

donde, en unidades consistentes,

$\Delta\varepsilon_{T/O}$ = salida térmica incremental inducida por la curvatura.

R = radio de curvatura de la superficie a ensayar en el lugar de la banda.

ν_{A-B} = coeficiente de Poisson medio del adhesivo y de la protección, respectivamente.

h_A, h_B = espesores del adhesivo y protección, respectivamente.

α_A, α_B = coeficientes de expansión térmica del adhesivo y protección, respectivamente.

α_S = coeficiente de expansión térmica del sustrato (material del espécimen).

ΔT = cambio de temperatura de la temperatura de referencia.

Se dan los valores aproximados de los parámetros del adhesivo y de la protección en la Tabla A-1 para las series de bandas y adhesivos representativos. El signo de la salida térmica incremental se obtiene de la Ec. (A-1) cuando los signos de ΔT y R se cuentan adecuadamente –esto es, un aumento en la temperatura de la temperatura de referencia es tomado como positivo, y una disminución como negativo; y por tanto, una curvatura convexa es positiva, mientras que una curvatura cóncava es negativa. El resultado calculado de la Ec. (A-1) se añade entonces algebraicamente a los datos de la salida térmica suministrados en el paquete de la banda para dar la salida térmica corregida con la curvatura para uso en la realización de correcciones de la salida térmica como se muestra en esta Nota Técnica.

TABLA A-1

Parámetros de Adhesivo y Protección para Uso con la Ec. A-1

<i>Tipo de adhesivo</i>	h_A, h_B	α_A, α_B
	Mm	por °C
M-Bond 200	0,015	81×10^{-6}
AE-10/15	0,025	81
M-Bond 600/610	0,005	81
<i>Serie de Banda (Protecciones)</i>		
EA, CEA, EP, ED	0,030	90×10^{-6}
SA, SK, SD, S2K	0,025	18
WA, WK, WD	0,038	18

Ya que los parámetros del adhesivo y de la protección dados en la Tabla A-1 son aproximados, y que están afectados por la técnica de instalación de la banda y por otras variables, la corrección de la curvatura definida en la Ec. (A-1) está limitada en precisión. Cuando la curvatura de la superficie es suficientemente grande de forma que la salida térmica incremental inducida por la curvatura puede ser muy importante, la salida térmica verdadera se debería medir según se describe anteriormente. En otras palabras, la banda extensométrica se debería adherir al elemento a ensayar como para la medida de deformación, se debería instalar

un termopar o sensor de resistencia con la temperatura adyacente a la banda, y el elemento de ensayo entonces sometido a las temperaturas de ensayo (mientras esté libre de tensiones mecánicas y térmicas) para grabar la salida térmica "verdadera".

Como ayuda en el juicio de la magnitud aproximada de la salida térmica inducida por la curvatura, la Ec. (A-1) se ha evaluado para varias combinaciones representativas de series de banda y adhesivos. Los parámetros de la Tabla A-1 fueron sustituidos en la ecuación, con $\alpha_s = 6,0 \times 10^{-6}$ asumiendo un material a ensayar de acero, y los resultados trazados en la Fig. A-1. Anote, en la figura, que la ordenada proporciona la salida térmica incremental *por cambio de unidad de temperatura* $-\Delta\epsilon_{T/O}/\Delta T$.

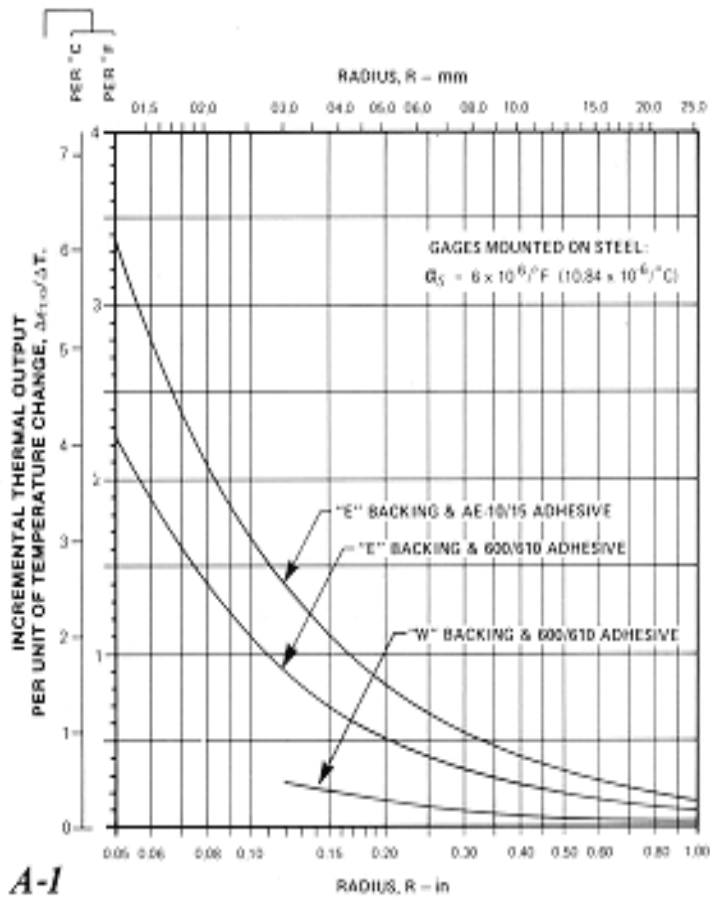


Fig. A-1