

CARACTERIZACION DE TUBOS DE ZIRCALOY-4 PARA VAINAS DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

A.D. Banchik y R. Volpi

Proyecto Planta Piloto-FAE-CNEA

INTRODUCCION

El análisis de los productos obtenidos durante el desarrollo de una tecnología de fabricación es una de las formas más adecuadas de evaluar la capacidad de dicha tecnología de fabricar productos de calidad bajo condiciones industriales de operación.

Dicho análisis, conocido normalmente como caracterización del producto, incluye estudios especiales del material y del producto, y el análisis estadístico de los datos. Esta información es empleada para estimar la variabilidad de dicha tecnología y predecir objetivamente la probabilidad de aceptación o rechazo de dichos productos en base a la comparación de dicha variabilidad con la tolerancia permitida a cada característica.

Para que la predicción arriba indicada sea lo más acertada posible, el análisis estadístico debe incluir tanto resultados de "ensayos de laboratorio" como de partida "experimentales" realizadas en condiciones lo más cercanas posibles a las de operación industrial.

En el presente trabajo se describen los resultados del análisis de datos correspondientes al desarrollo en CNEA de la tecnología de fabricación de vainas de Zircaloy-4 para elementos combustibles. En este desarrollo se produjeron vainas, tanto bajo condiciones de "laboratorio" como de "partidas piloto". Estas últimas se llevaron a cabo mediante el mismo equipamiento de manufactura y control que el que se emplea en operación industrial habiéndose además aplicado un sistema de garantía de calidad para mantener bajo estricto control las condiciones de operación.

CARACTERISTICAS CONTROLADAS EN LAS VAINAS COMBUSTIBLES

Las características de calidad de los tubos para vainas combustibles se dividen en tres grupos. El primer grupo está integrado por a) las características mecánicas y metalúrgicas de las vainas tales como propiedades mecánicas uni- y biaxiales, orientación de hidruros, tamaño de grano y resistencia a la corrosión, y b) las características del material como ser, composición química y grado de pureza. El segundo grupo incluye las dimensiones de las vainas y sus tolerancias. El tercer grupo comprende los defectos del producto, en particular los defectos superficiales.

De la experiencia acumulada hasta el presente, las características mecánicas son las únicas características del primer grupo de alta variabilidad y por lo tanto las únicas del primer grupo que serán

tratadas en el presente trabajo.

Las características dimensionales a analizar serán el diámetro externo, el espesor de pared y la excentricidad y ovalidad de los tubos.

TECNICAS EXPERIMENTALES

Debido a que la variabilidad de las técnicas de medición pueden llegar a ser comparables a la variabilidad de los procesos de fabricación, la operación de los equipos de medición se realiza bajo un estricto control que incluye calibración diaria y/o periódica del equipamiento, registro gráfico de cada parámetro de operación, empleo de planillas especiales para asiento de datos y control de los resultados de los ensayos a los efectos de verificar su correcta ejecución.

El equipamiento para ensayos mecánicos consta de tres equipos: uno para ensayos uniaxiales a temperatura ambiente y alta temperatura sin control de atmósfera y dos equipos para ensayos biaxiales por presurización interna y a la temperatura de 673°K. Los ensayos mecánicos uniaxiales son realizados en una máquina Instron modelo 1125 con extensometría.

Las probetas empleadas son trozos de tubos de longitud adecuada a las exigencias de la norma ASTM-E-8/73, para probetas tubulares con distancia calibrada a 50mm. La temperatura y el gradiente de temperatura en las probetas se mide mediante tres termocuplas envainadas. La calibración de la escala de carga se realiza diariamente en forma electrónica y periódicamente mediante un anillo deformable calibrado marca Tinius-Olsem.

La sensibilidad de la escala de carga es de 40 N/mm. La calibración de la escala de alargamiento se realiza mediante un calibrador de extensómetros con graduación mínima igual a 2 micrones. La amplificación de esta escala de desplazamiento es de 400 veces o 0,0025mm/mm sobre el gráfico.

La medición de las probetas se realiza mediante un banco micrométrico marca Mabro, con mínima graduación igual a 1 micrón y su calibración se realiza mediante un juego de galgas clase A.

Los parámetros que se calculan del gráfico carga-desplazamiento son el punto de fluencia a 2% de deformación plástica ($\sigma_{0,2}$), la tensión máxima σ_M y la deformación total.

Los ensayos de fluencia térmica o "creep" y de explosión se realizan en dos equipos diseñados en CNEA y construidos por INVAP.

Los componentes comunes a ambos equipos son:

- a) el sistema de calefacción por circulación forzada con regulación de temperatura $\pm 1^\circ\text{K}$.
- b) la medición de temperatura mediante 4 termocuplas envainas de Chromel Alumen de $\phi 1,5$ mm en contacto mecánico con las probetas.
- c) la medición de las dimensiones de las probetas mediante el banco micrométrico arriba nombrado.

El equipo de fluencia térmica permite ensayar 8 probetas tubulares simultáneamente hasta presiones internas de 250 atm. y temperaturas de ensayo de 700°K máximo por períodos prolongados de tiempo.

Las condiciones de ensayo son las siguientes: $T=673^{\circ}\text{K}$ con regulación de temperatura y gradientes de temperatura entre probetas que en total no sobrepasa $\pm 2^{\circ}\text{K}$, y variaciones de presiones no superiores a 0,5 atm. La tensión circunferencial de ensayo σ_{θ} debe ser igual o superior a 15 Kg/mm^2 y el tiempo de ensayo de 10 días.

El ajuste preciso de la presión de ensayo y su control diario, se realizó mediante un manómetro de precisión marca Wika, clase 0,5. El parámetro que se mide en el ensayo de fluencia térmico es la deformación circunferencial total porcentual (%) calculada en base al cambio de dimensiones del diámetro externo. El equipo de explosión permite ensayar cuatro probetas por ensayo en forma sucesiva. El ensayo requiere presurización lineal a una velocidad de más de 50 atm/mm hasta ruptura.

El ensayo de explosión se realiza cuando la temperatura de cada probeta es de 673°K . El parámetro que se controla es el cambio del diámetro externo en una sección transversal situada a 20 mm del extremo de ruptura de la probeta.

El control mediante ultrasonido de dimensiones y defectos se realiza mediante la técnica de "pulso-eco" por inmersión, en la longitud total de la vaina. Para el control de dimensiones se utiliza la configuración de tres transductores (2 de medición y 1 de referencia y compensación de temperatura del medio acoplante). Para la detección de señales de defectos se dispone de cuatro transductores focalizados y desplazados lateral y angularmente del eje de simetría del tubo. En ambos casos las señales correspondientes al pasaje de cada tubo se grafican en un registrador rápido Gould, modelo 2200.

El equipo se calibra mediante un patrón de diámetro y espesor de pared que abarcan el rango en estudio y que posee, además, defectos artificiales de tamaño y morfología definidas, según normas específicas (ASTM E-214-68) v.g. tipo ranuras longitudinales y transversales en forma de "V" con ángulo de 60° y profundidades entre el 5 y el 10% del espesor de pared.

Debido a la posible variabilidad del equipo, la calibración se realiza cada 10 tubos o cada 1/2 hora para control de deriva. La sensibilidad, en condiciones normales de operación, se ajusta en 2 micrones/mm desde la escala de registro o sea una amplificación de 500X, pudiéndose lograr, en condiciones de escala ampliada, hasta 5 veces este valor. El equipo utilizado consta de un módulo para control de dimensiones Sonic Uwa MK III; un módulo para control de defectos superficiales Sonic FTS MK II y opera con transductores de 10 Mhz con una frecuencia de retención de 5 Khz.

DESCRIPCION DE RESULTADOS:

En la Tabla 1 se resumen los resultados correspondientes a las características mecánicas de los tubos ensayados. En la primera parte se indican los valores requeridos por las especificaciones, mientras que en la segunda parte se muestran los valores medios \bar{X} y dispersión estandar de cada parámetro mecánico. También se incluye en esta parte el valor X (99%) calculado a partir del valor medio \bar{X} y de la dispersión σ , para una probabilidad del 99% asumiendo una distribución normal. También se incluye $\sigma_{\text{típico}}$ según datos de literatura (1).

La Tabla II resume los valores de las características dimensionales. En la primera columna se indica el rango permitido de variación, del diámetro externo y del espesor de pared alrededor de sus valores medios específicos. Para el resto de las características el valor indicado en dicha columna es el valor máximo permitido.

En la segunda columna se calcula el índice $\Lambda_1 = (\bar{X} - \mu) / R$ que mide el grado de desviación de los valores medios observados \bar{X} respecto al valor μ , normalizada esta diferencia por el valor permitido del rango R . Para las dos primeras características mostradas en la Tabla II, se ha tomado el valor μ igual al valor especificado en la norma, mientras que para el resto de las características el valor μ se tomó igual a 0. La tercera columna indica la estimación de la dispersión estandar σ de la población.

Los valores indicados de σ para la ovalidad y la excentricidad son la cota superior elegida para dichas características debido al hecho de que los valores medidos experimentalmente son muy pequeños. En la cuarta columna se representa el índice $\Lambda_2^1 = 6\sigma / R$, calculado únicamente para las dos primeras características; mientras que en la quinta columna se representa el índice $\Lambda_2^2 = 3\sigma / R$. La última columna indica el número mínimo de mediciones.

A fin de determinar la forma de variación del diámetro y del espesor de pared y entender el significado de la ovalidad y de la excentricidad, se obtuvieron con el equipo de ultrasonido, operando con alta ganancia, los gráficos de la Figura 1. Las variaciones reales de las características dimensionales están representadas por las variaciones de la envolvente de la señal graficada para cada característica. En el caso del diámetro externo se observa que la envolvente oscila entre valores mínimos del orden de 2 micrones hasta valores máximos del orden de 10 a 20 micrones con un período del orden de 15 a 20mm a lo largo de la longitud del tubo. El espesor de pared también muestra un comportamiento oscilante pero con un período mucho mayor del orden de 200 a 300mm. Por último, bajo condiciones de operación del equipo de ultrasonido de muy alta ganancia, se puede observar claramente, en el gráfico de espesor de pared, una componente adicional representada por nueve mínimos superpuestos a la variación fundamental del espesor de pared. Debido a que las variaciones de la señal que representa al espesor de pared son del orden de 10 a 20 micrones, los máximos a los que se refiere el párrafo anterior son del orden de 1 a 2 micrones de altura.

DISCUSION

El objetivo del presente trabajo es prever la posibilidad de aceptación de los tubos fabricados con la tecnología desarrollada en la CNEA cuando sean producidos a nivel industrial. Por esta razón se ha incluido en la Tabla I la columna 6 donde se indica el valor que cada característica debe tomar para incluir el 99% de los datos. Para el caso del "creep", este valor es menor al máximo permitido, mientras que para el resto de las características mecánicas dicho valor es superior al mínimo permitido.

Esta relación entre las tolerancias y el valor \bar{X} (99%) indica que cada una de las características satisfará la tolerancia correspon-

diente con una posibilidad mínima del 99%. Para estudiar la probabilidad de aceptación simultánea, de todas las características se debe reconocer que la ductilidad, fila 5 y las características mecánicas a temperatura ambiente están muy "alejadas" de los valores permitidos. Las únicas características importantes para calcular dicha probabilidad, son la fluencia térmica (creep), explosión y el punto de fluencia y tensión máxima a 673°K. Asumiendo una independencia entre dichas características la probabilidad de aceptación simultánea será del 96%. Este cálculo depende de la estimación de la dispersión estandar σ de la población. Por ello, se ha agregado una columna donde se incluye el parámetro σ_{tipico} obtenido de la literatura (1). La diferencia entre σ y σ_{tipico} de la Tabla I para cada característica es pequeña y sólo para el caso del ensayo de explosión σ_{tipico} es superior a σ . Si se calcula X (99%) mediante σ_{tipico} se obtiene que X (99%)=2,3%, valor menor al permitido 2,5%. De esta manera se reduce la probabilidad al 97% y por ende la probabilidad simultánea a 94%, valor este que no afecta significativamente la estimación de la probabilidad de aceptación.

Iguales comentarios pueden hacerse para estimar la probabilidad de aceptación de las características dimensionales. El índice dado en la 2^a columna de la Tabla II mide el grado de exactitud de la tecnología empleada para obtener el valor especificado μ ; mientras que los índices de la 4^a y 5^a columna dan una precisión de dicha tecnología.

En conjunto la suma de los valores de las columnas 2^a y 4^a para las características acotadas superior e inferiormente y la suma de la 2^a y 5^a para las acotadas en un único extremo deberá ser menor o igual al 100% para que la probabilidad de obtener tubos aceptables sea mayor del 99% para cada característica.

De los datos obtenidos se deduce que las características críticas son la rugosidad y la desviación de linealidad que alcanzan el 113 y 110% respectivamente. La probabilidad de la rugosidad se reduciría por lo tanto al 98% y la simultánea al 57%. De la observación de la Figura 1 se deduce que los valores de ovalidad medidos en inspección de rutina corresponden al máximo de dicha función. El comportamiento periódico, regular y la presencia de nodos en que la ovalidad es prácticamente nula es un fenómeno destacable que merecería un estudio más detallado.

Hasta el presente no se ha descrito en la literatura especializada la estructura de la función excentricidad en la que se observan 9 zonas de disminución localizada del espesor de pared de aproximadamente 2 intermedias (Fig 2).

Existen evidencias que indican una correlación entre la constancia de estas zonas con la ductilidad medida en los ensayos de explosión. En efecto en una serie de tubos fabricados en condiciones no rutinaria se obtuvieron valores de ductilidad que oscilan entre 2,9 y 4% con un valor medio $\bar{X} = 3,6\%$; significativamente menores a los dados en Tabla I fila 2 y se observaron en forma muy acentuada 9 zonas de disminución localizada del espesor de pared a lo largo del eje longitudinal. En este caso la rotura se produjo en dicho sentido como se muestra en la Fig 3 probeta superior, correspondiendo la probeta inferior a una rotura de tubos fabricados en condiciones normales con duc-

tilidad media de $\bar{X} = 5\%$.

Este resúmen se deduce que la ductilidad no sólo depende de la excentricidad (Ref 2) donde se mencionan valores medios máxima del orden del 3% sino también de la intensidad con que se presenta la estructura fina arriba mencionada.

REFERENCIAS

- 1 - R.Rose; K.Lunde. SAAs. Nuclear Eng. and Design (33) 1975 - 219-229.
- 2 - H.G.Weidinger. KWI-AG-Erlangen. IAEA-Regional Seminar-Quality in Nuclear Fuel Technology. Br.Aa. Nov. 1973.

TABLA I - RESUMEN ESTADISTICO DE CARACTERISTICAS MECANICAS.-

VARIABLE	ESPECIFICADO		MEDIDO				6/ σ típico
	1/ VALOR		2/ VALOR	3/	4/	5/	
	Máx.	Mín.	MEDIO \bar{X}	n	σ	X {99%}	
1/ CREEP (%)	1	-	0,71	97	0,113	0,97	0,10
2/ EXPLOSION (%)	-	2,5	5,10	111	0,98	2,8	1,20
3/ σ 0,2	-	27,0	31,42	66	1,31	28,4	1,00
400°C σ máx	-	34,0	37,73	56	0,96	35,5	1,40
δ	-	10,0	28,70	59	2,90	22,0	2,30
4/ σ 0,2	-	46,0	57,60	58	0,98	55,3	2,20
20°C σ máx	-	60,0	69,86	57	1,40	66,6	1,30
δ	-	12,0	24,40	54	1,68	20,5	1,50

TABLA II - RESUMEN ESTADISTICO DE CARACTERISTICAS DIMENSIONALES.-

VARIABLE	1/ RANGO	2/	3/	4/	5/	6/ n
		$\frac{\bar{X}-\mu}{R} \times 100$	σ	$\frac{6\sigma}{R} \times 100$	$\frac{3\sigma}{R} \times 100$	
1/ DIAMETRO EXTERNO {mm}	0,10	10 %	0,12	70 %	-	> 200
2/ ESPESOR DE PARED {mm}	0,08	4 %	0,006	45 %	-	> 200
3/ OVALIDAD {µm}	100 máx	20 %	10	-	<< 30 %	> 200
4/ EXCENTRICIDAD {µm}	70 máx	30 %	10	-	< 45 %	> 200
5/ RUGOSIDAD R_{a1} {µm}	0,7 máx	70 %	0,10	-	43 %	> 100
6/ DESVIACION LINEAL {mm / mt}	1,0 máx	40%	0,20	-	60 %	> 100

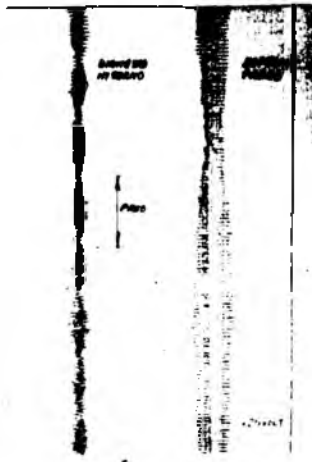


FIG 1



FIG 2



FIG 3