

ANALISIS DE LA MICROESTRUCTURA DE SOLDADURAS DE ZIRCALOY 4
EN VAINAS DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES.

R. Bordoni*, A.M. Olmedo**.

* Departamento de Combustibles Nucleares-CNEA.

** Departamento Química de Reactores-CNEA.

Los procesos de soldadura empleados para soldar patines y tapones a las vainas de elementos combustibles de Zircaloy involucran un calentamiento de estas componentes o de áreas localizadas de las mismas a temperaturas bien por arriba de 975° C, lo cual puede ser perjudicial para algunas de las propiedades que se obtienen durante su cuidadosa fabricación. Uno de los mayores problemas que se encuentra en soldar Zircaloy es la contaminación del mismo a alta T, especialmente con oxígeno y nitrógeno. Estas impurezas en altas concentraciones fragilizan al mismo; así como el nitrógeno produce una pérdida en la resistencia a la corrosión. La difusión de estos elementos es muy rápida a las temperaturas requeridas para soldar el Zircaloy, por lo cual para lograr la producción de soldaduras dúctiles y resistentes a la corrosión es necesario emplear procesos que impliquen su soldadura en atmósfera controlada, vacío o soldar en el orden de unos milisegundos para evitar la absorción de gases.

Durante la soldadura de las vainas de elementos combustibles la zona de soldadura es calentada localmente a temperaturas elevadas dentro del rango 10^3 , incluso hasta la temperatura de fusión, y luego las diferentes partes de la misma se enfrían con diferentes velocidades. Estos ciclos de calentamiento y enfriamiento inducen transformaciones de fase en las distintas partes de la región soldada.

Dos de los procesos comunmente empleados para soldar tapones y patines a vainas de elementos combustibles son los procesos TIG y soldadura por resistencia. Teniendo en cuenta el ciclo térmico producido durante estos procesos los mismos se pueden dividir de acuerdo a sus velocidades de calentamiento y enfriamiento en dos grupos:

- i) El proceso de soldadura por resistencia se realiza en un período de tiempo muy breve y con éste está asociado una velocidad de calentamiento y enfriamiento en el orden de 10^3 °C/s debido a la naturaleza local del mismo.
- ii) En el proceso TIG (soldadura por arco con electrodo no consumible y protección de gas inerte) la cantidad de calor absorbida es muy grande y la velocidad de enfriamiento es más len-

ta que en (i) y está en el orden de $10-10^2$ °C/s.

El propósito del trabajo fue caracterizar las microestructuras asociadas a ambos procesos ya que las mismas están relacionadas con los ciclos térmicos asociados a cada proceso y que son muy disímiles entre sí.

Experimental

Las muestras utilizadas fueron tapones soldados a vainas por el proceso TIG y patines soldados a vainas mediante el proceso de soldadura por resistencia (proyección). Las soldaduras fueron realizadas bajo especificaciones y se les hizo diferentes ensayos de control en comúnmente empleados (tales como ensayo de explosión, corrosión, arranque). Las soldaduras no presentaban defectos tales como porosidades, fisuras. Para su examen metalográfico se prepararon mediante un pulido mecánico con papel esmeril hasta 600 y luego con un pulido químico con $H_2O: HNO_3: HF$, posteriormente a algunas de las soldaduras por resistencia se les realizó un anodizado.

Resultados y discusión

a) TIG

El proceso TIG fue el primer proceso empleado para soldar tapones a vainas de elementos combustibles. Es el proceso que se usa en los elementos combustibles Atucha.

La Figura 1 muestra la soldadura tapón-vaina tipo Atucha mediante este proceso. En ella se pueden apreciar las siguientes zonas

- a) soldadura
- b) zona termicamente afectada (ZAT)
- c) tubo no afectado
- d) tapón no afectado

El cordón de soldadura contiene grandes grano β columnares transformados y placas α representativos de la zona de fusión, Fig.2. En una zona adyacente a la soldadura, tanto en el tapón como en el tubo, la temperatura subió hasta el rango β pero no hasta el punto de fusión, Figs. 2 y 3. Esta zona contiene granos β transformados de menor tamaño que los correspondientes a la zona fundida. Una estructura Widmanstätten típica de la ZAT se muestra en la Fig.4. La estructura β transformada es esencialmente la misma en las diferentes partes de la soldadura, pero difiere fundamentalmente en el tamaño de placas debido a sus diferentes velocidades de enfriamiento. Otra parte de la ZAT es una región, tanto en el tubo como en el tapón, en la cual la máxima temperatura alcanzó el rango $\alpha + \beta$. Esta estructura

* en autoclave

consiste en islas de matriz α junto con placas α resultantes de la transformación desde la fase β , Fig.5. En la Fig. 6 se muestra una parte de esta zona en la cual se observa la nucleación de placas en borde de grano. Debido a la velocidad de enfriamiento relativamente lenta de este proceso se produce una transformación con difusión dando origen a una estructura Widmanstätten heterogénea con precipitación intercrystalina de los elementos de aleación. Las partículas de 2ª fase y los bordes de grano β producen la nucleación de estas placas y la difusión de los elementos de aleación controlan la velocidad de crecimiento de las mismas (1y2). Debido a la velocidad de enfriamiento relativamente lenta de este proceso es de fundamental importancia cuidar la pureza de los gases protectores para asegurar soldaduras resistentes a la corrosión.

Finalmente la última parte de la ZAT es aquella zona donde la temperatura no excedió la temperatura de transformación pero fué suficientemente elevada para producir recristalización y crecimiento de los granos α , Fig.7. El tubo no afectado es una región excluida de los efectos de calentamiento producidos por efecto de la soldadura y está caracterizado por granos α mostrando una elongación preferencial debido a la deformación plástica producida durante la fabricación de los mismos, mientras que el tapón no afectado presenta una estructura de granos α equiaxiales.

b) Soldadura por resistencia

La alta resistividad eléctrica y térmica del Zircaloy lo hacen muy adecuado para soldarlo mediante el proceso de soldadura por resistencia. Un factor importante de este proceso es que puede ser ejecutado bajo cualquier presión de gas, aún en aire, debido a que los tiempos de calentamiento y enfriamiento son extremadamente pequeños.

La Fig.8 muestra una soldadura de patín-vaina mediante este proceso en una vaina tipo Atucha. Después de una adecuada preparación metalográfica se pueden identificar:

- a) soldadura
- b) HAZ
- c) material base no afectado

La Fig.9 muestra una micrografía correspondiente a la parte de la HAZ en la zona central de la vaina, en cambio la Fig. 10 muestra una parte de la ZAT correspondiente al patín. Ambas micrografías muestran una microestructura mucho más fina que en el proceso TIG. La Fig.11 es una micrografía en la que se observa la zona de transición entre la ZAT antes mostrada y la estructura del tubo no afectado. En ella se pueden observar pequeños granos posiblemente recristalizados, siendo esta zona mucho más pequeña que en el proceso TIG. Tanto la microestructura de la zona de unión como la correspondiente a la ZAT son similares consistiendo en granos β transformados. La Fig.12 es una

micrografía de barrido de una zona mostrada antes por microscopía óptica correspondiente a una zona adyacente a la unión entre patín y vaina. La Fig. 13 es una micrografía de barrido en la que se muestra la interfase de unión (weld line) donde se observa que las zonas de fusión alternan con zonas donde no las hay, en cambio la Fig. 14 es una parte de esta zona mostrando una región donde no hubo fusión-pero sí unión-hecho evidenciado por el cambio de morfología a ambos lados de la línea de soldadura.

El análisis realizado con microsonda indicó que no había segregación de Fe, Cr y Sn en la zona de soldadura y los valores de microdureza fueron mayores en la soldadura y ZAT que en el material no afectado. El análisis de gases indicó que no hubo absorción apreciable de oxígeno y nitrógeno en dicha zona.

La morfología de la fina estructura acicular encontrada en las soldaduras por resistencia mostradas en las micrografías, Figs. 9 y 10, es similar a la microestructura encontrada por Holt (1) en una probeta enfriada desde el campo β a una velocidad de 2.10^3 °C/s y el cual la denomina estructura martensítica; en un trabajo posterior (3) encuentra estructuras parcialmente martensíticas enfriando a velocidades de aproximadamente 600 °C/s. Woo y Tangri (4) reportan la presencia de una estructura martensítica con un espesor entre 0.5-0.8 μ en muestras enfriadas desde el campo β a 1300 °C/s aproximadamente. Bodmer et al. (5) también han reportado la presencia de martensita en Zircaloy 2 en probetas soldadas mediante el proceso de electron beam; dicho proceso también tiene asociadas velocidades de enfriamiento muy rápidas. Por otro lado existe un modelo matemático (6) (realizado para aceros) el cual predice que las velocidades de enfriamiento de este proceso alcanzan los valores de 2.10^3 °C/s. Estas velocidades son muy rápidas en comparación con las velocidades involucradas en tratamientos térmicos normales del acero (y en soldaduras por arco) y se ha visto que produce transformaciones martensíticas aún en aceros de bajo C no endurecibles.

Una importante consecuencia de estas velocidades de calentamiento y enfriamiento inherentes a este proceso, en el cual no se produce absorción apreciable de gases, es asegurar buenas propiedades de corrosión.

Conclusiones

La microestructura de la región soldada y HAZ tapón-vaina realizada por el proceso TIG es significativamente diferente del material base; la ZAT penetra unos cuantos mm dentro del tubo. Dicha diferencia de microestructura puede ser aplicada en términos de las transformaciones de fase que ocurren como resultado del ciclo térmico. El cordón de soldadura se caracteriza por una estructura de grano columnar representativa de la fusión. La ZAT presenta un tamaño de grano intermedio entre el

cordón y el material base y puede dividirse en tres partes caracterizadas por la máxima T alcanzada en cada zona.

En el caso de la soldadura por resistencia de patines la unión entre ambas partes puede producirse sin fusión significativa de las mismas. La HAZ es muy estrecha (mucho menor que en el TIG) y consiste fundamentalmente de estructura tipo martensístico o Widmanstätten muy fina como consecuencia del rápido ciclo térmico asociado al proceso.

Desde el punto de vista microestructural el proceso de soldadura por resistencia tiene las siguientes ventajas frente al TIG.

- menor tamaño de la HAZ
- menor tamaño de grano
- menor probabilidad de contaminación con impurezas
- mejor posibilidad de una distribución homogénea de partículas de 2ª fase

No obstante la transición brusca de microestructura entre la zona de soldadura y tubo no afectado puede producir una mayor sensibilización de la corrosión bajo tensiones.

Referencias

- 1.- R.A. Holt, J. Nuclear Mater 35 (1970) 322
- 2.- G. Okvist, K. Kallstrom, J. Nuclear Mater 35 (1970) 316
- 3.- R.A. Holt, J. Nuclear Mater, 47 (1973) 262
- 4.- O.T. Woo, K. Tangri, J. Nuclear Mater. 79 (1979) 82
- 5.- E. Bodmer, J.J. Chene, R.O. Erikson y R. Ferrarini. Proc. 3rd Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva Set. 1964 vol. 9, 173
- 6.- J.A. Greenwood, Brit. Eeld. J. 8 (1961) 316

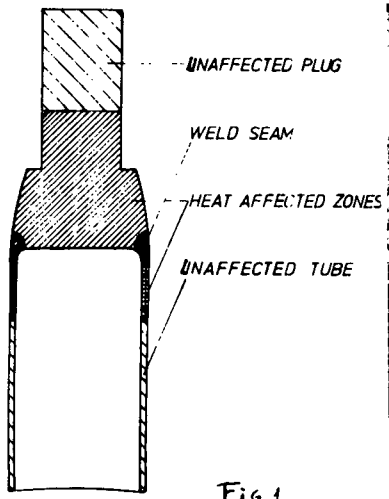


Fig.1



Fig.2



Fig.3



Fig.4

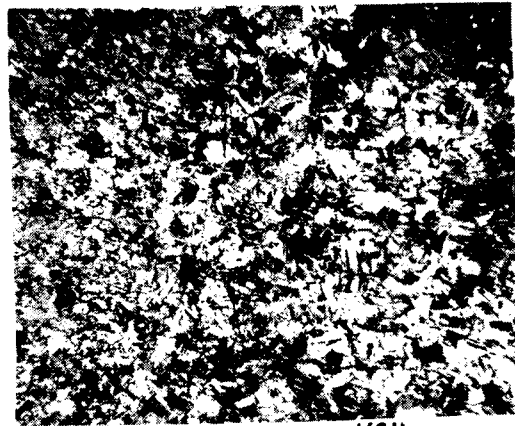


Fig.5



Fig.6

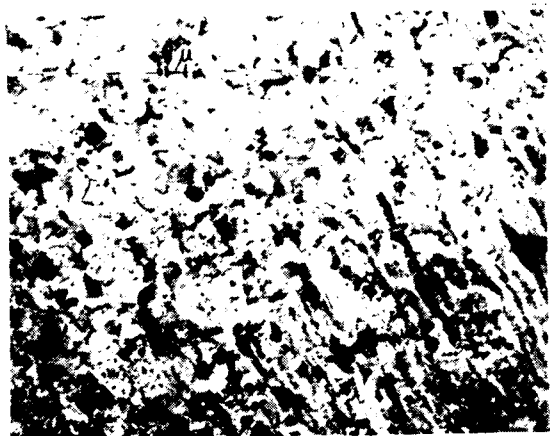


Fig.7

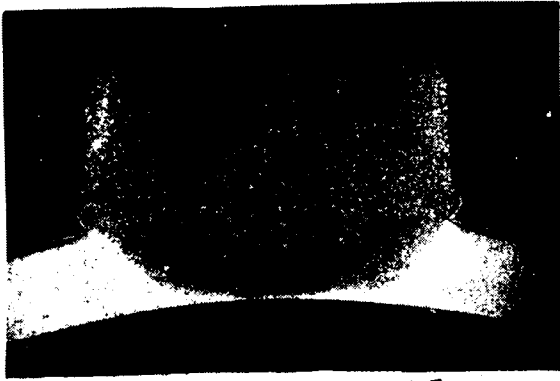


FIG. 8 0.5mm

FIG. 9 13μ

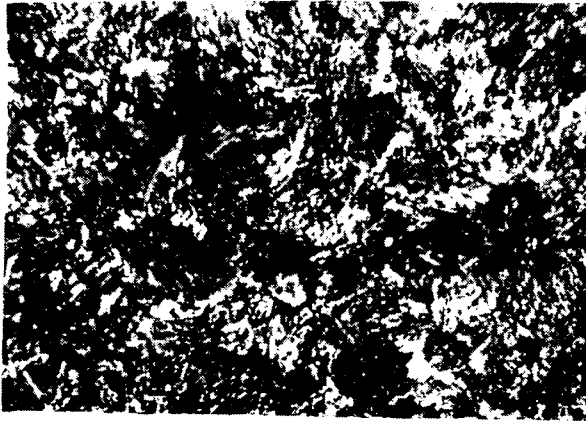


FIG. 10 13μ

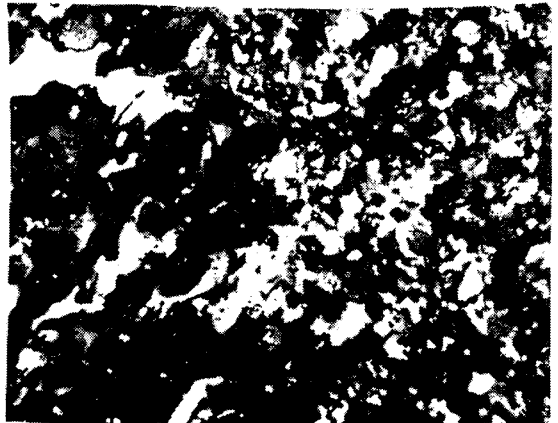


FIG. 11 13μ

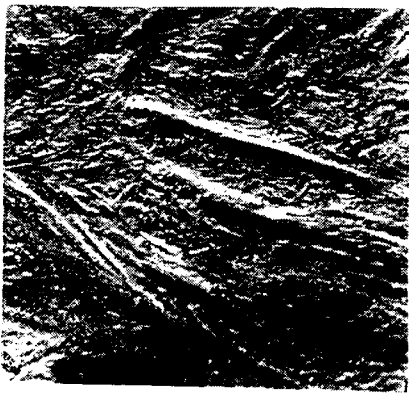


FIG. 12 1.5μ

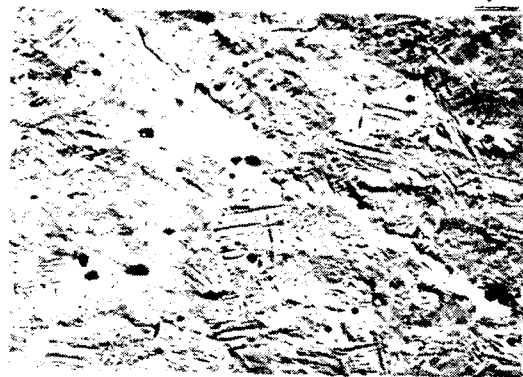


FIG. 13 10μ

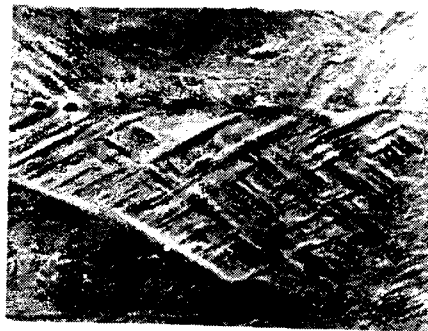


FIG. 14 3μ