

a temperaturas ambiente de más de 40°C sin que su rendimiento sea inferior al que tendría en las condiciones climáticas normales de las zonas templadas.

Entre otras cosas, el documento da las especificaciones que han de cumplirse al diseñar y construir el equipo, y al probarlo, marcarlo, etiquetarlo y embalarlo. Todos los instrumentos que encargue el Organismo para su envío a países tropicales tendrán que ir embalados de manera que su rendimiento y su precisión no disminuyan con las vibraciones y golpes que puedan sufrir durante el transporte, ni aunque se les manipule con poco cuidado durante las operaciones de carga y descarga. Por lo que respecta a las pruebas, todos los instrumentos adquiridos por el Orga-

nismo tienen que haber funcionado por lo menos 100 horas en las condiciones que suelen reinar en un laboratorio o en una fábrica antes de someterlos a los ensayos finales, que se efectuarán en presencia de un representante o un agente designado por el Organismo. En algunos casos se necesitarán ensayos especiales para comprobar la resistencia de un instrumento o de cualquiera de sus piezas a las variaciones bruscas del calor y de la humedad.

Se ha procurado que todas las recomendaciones que contiene el documento se basen en procedimientos convenidos internacionalmente; para ello se han utilizado las normas recomendadas y publicadas por la Comisión Electrotécnica Internacional.

---

## CORROSION DE LOS MATERIALES PARA REACTORES

La ingeniería nuclear y la ingeniería astronáutica, que son las dos ramas más jóvenes de la tecnología, exigen materiales cada vez más perfectos con especificaciones sumamente rigurosas entre las que figuran propiedades físicas y químicas que antes no se tenían en cuenta. Una de las características que esos materiales deben necesariamente reunir es una gran resistencia a la corrosión. Se ha dicho con frecuencia que la resistencia a la corrosión es el principal problema que plantea la elección de materiales para reactores.

Entre esos materiales figuran los combustibles nucleares (principalmente uranio, pero también plutonio y torio), el revestimiento del combustible y las tuberías y recipientes por los que circula el refrigerante (acero, aluminio, circonio y diversas aleaciones), los moderadores (grafito, berilio, etc.), los blindajes (hormigones de diversa composición) y los metales utilizados en los componentes del reactor. Todos estos materiales están expuestos a la fuerte acción corrosiva de refrigerantes a temperaturas y presiones elevadas; las radiaciones reducen, además, la resistencia de algunos de ellos a la corrosión.

Una corrosión intensa puede afectar al rendimiento de ciertas partes del reactor y reducir su vida útil. Ello requerirá trabajos de reparación y acondicionamiento que obligarán a aumentar el número de paros; este factor tiene suma importancia dado el considerable costo de los reactores.

Hay que tener también en cuenta los peligros que puede entrañar la contaminación del circuito primario de refrigeración con productos de fisión altamente radiactivos liberados por la corrosión del revestimiento de los elementos combustibles. Además, un escape en el circuito primario, ocasionado por la corrosión, puede contaminar las instalaciones adyacentes e incluso los alrededores del reactor. Los productos de la corrosión no sólo pueden entorpecer el flujo de los líquidos refrigerantes en los intercambiadores de calor y en los circuitos de refrigeración, sino que también pueden hacerse radiactivos y contaminar todo el sistema emitiendo radiaciones muy peligrosas. Por último, la contaminación radiactiva puede obligar a parar el reactor durante un período prolongado, con las consiguientes pérdidas económicas.

Como, en general, la eficacia de un reactor aumenta precisamente con los factores que incrementan la corrosión (principalmente, la elevación de la temperatura), la resistencia a la corrosión tiene una considerable importancia económica.

Durante los últimos años y, en particular, desde que terminó la Conferencia sobre Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos, celebrada en Ginebra en 1958, se ha acumulado una gran cantidad de datos experimentales sobre la corrosión de los materiales para reactores. Teniendo en cuenta la necesidad de reunir y analizar críticamente los resultados obtenidos desde entonces por los investigado-

res, el OIEA organizó en Salzburgo (4 a 9 de junio de 1962) una conferencia sobre corrosión de los materiales para reactores. En ella se discutieron problemas teóricos, experimentales y de ingeniería relacionados con los fenómenos de corrosión que se producen en los reactores nucleares y en sus circuitos auxiliares. Participaron en la conferencia unos 200 expertos de 23 países.

## Comportamiento del acero

Algunas de las memorias presentadas trataban de este tema. H. Incuye (Estados Unidos) expuso los resultados de sus estudios sobre las reacciones a temperatura elevada de ciertos tipos de acero inoxidable en una atmósfera de helio con concentraciones bajas de anhídrido carbónico y óxido de carbono. Esos estudios forman parte del programa de desarrollo de combustible para el reactor experimental refrigerado por gas.

R. Darras, D. Leclercq y H. Loriers (Francia) describieron la acción corrosiva que el anhídrido carbónico a presión ejerce sobre los aceros estructurales a temperaturas comprendidas entre 450 y 550°C. Aunque con frecuencia han sido muy distintos, los resultados obtenidos con aceros y gases de diversa composición son sumamente significativos.

H. E. McCoy, Jr. (Estados Unidos) trató de la interacción de los gases y los metales y de sus efectos sobre el rendimiento de estos últimos. Las investigaciones descritas en su memoria se emprendieron con objeto de lograr una elevación de la temperatura de funcionamiento de los reactores refrigerados con gas seleccionando adecuadamente los materiales estructurales y los revestimientos de los elementos combustibles. Los experimentos se realizaron a temperaturas comprendidas entre 700 y 900°C con aceros inoxidables, aleaciones a base de níquel y metales refractarios en atmósferas de argón, hidrógeno, óxido de carbono, anhídrido carbónico, nitrógeno, aire y oxígeno. V. V. Gerasimov (Unión Soviética) expuso los resultados de sus investigaciones sobre la cinética de los procesos electroquímicos a temperaturas no superiores a 300°C y a presiones de 87 atmósferas como máximo. Los datos obtenidos permiten predecir el comportamiento, frente a la corrosión, de los materiales estructurales a las temperaturas críticas en agua de cualquier composición.

V. S. Liashenko, V. V. Zotov y V. A. Ivanov (Unión Soviética) presentaron los resultados de los trabajos experimentales que han realizado para determinar la resistencia a la corrosión de varias muestras de acero en una corriente de sodio líquido a temperaturas de 600 y 700°C. Diversas impurezas ejercen una influencia muy marcada en la resistencia de estos materiales a la corrosión, aumentándola o reduciéndola.

F. M. Lang y P. Magnier (Francia) informaron acerca de sus estudios sobre la corrosión del grafito

por los gases refrigerantes. Muchos carbonos y grafitos de alto grado de pureza y de origen muy diverso tienen prácticamente las mismas características por lo que respecta a la corrosión. La humedad y la presencia de hidrógeno ejercen una influencia apreciable; la velocidad de oxidación depende de la temperatura.

T. B. Copestake y F. S. Feates (Reino Unido) describieron sus experimentos sobre el empleo del carbono-14 para el estudio del transporte de carbono en las reacciones radioinducidas entre el carbono y el anhídrido carbónico en un reactor moderado con grafito y refrigerado con anhídrido carbónico. Incorporaron carbono-14 en el grafito y estudiaron la gaseificación de este último midiendo la actividad del carbono-14.

## Aleaciones de aluminio y de circonio

La corrosión de las aleaciones de aluminio en el agua a elevada temperatura (de 260 a 315°C) depende, en parte, de las condiciones en que se realicen los ensayos. Según J. E. Draley y W. E. Ruther (Estados Unidos), la corrosión varía mucho cuando la corriente de agua en contacto con la superficie metálica es rápida. Variaciones aparentemente pequeñas de las condiciones dan lugar a alteraciones apreciables de la velocidad de corrosión. El contenido de silicio en las aleaciones de aluminio-níquel-hierro influye notablemente en su comportamiento frente a la corrosión. Las aleaciones con bajo contenido de silicio resisten mejor que aquellas cuyo contenido en silicio es más normal.

K. Videm (Noruega) expuso los ensayos realizados con aleaciones que contenían un diez por ciento de silicio además del uno por ciento de níquel que generalmente se incorpora al aluminio para que resista temperaturas elevadas. Esas aleaciones son más resistentes a la corrosión que las aleaciones corrientes.

M. J. Brabers (Bélgica) trató de los estudios sobre la formación de capas de óxido en la superficie del aluminio de gran pureza y de sus aleaciones, realizados por medio de un "transitómetro". Este aparato consta de una fuente de corriente de intensidad constante, de un interruptor que abre el circuito cuando se alcanzan ciertos valores predeterminados de la tensión, y de un cronómetro electrónico que funciona simultáneamente.

Varios expertos trataron del circonio, uno de los materiales nucleares más importantes para obtener aleaciones resistentes a la corrosión.

Un grupo de hombres de ciencia soviéticos, I. L. Rosenfeld, I. P. Oljovnikov y A. A. Sudarikova, informaron acerca de la influencia de la composición del agua sobre la corrosión de las aleaciones de circonio a presiones y temperaturas elevadas. Las aleaciones de circonio con niobio, así como las aleaciones de circonio con plomo, hierro, níquel y niobio, presentan una resistencia muy elevada a la corrosión por el

agua destilada a la temperatura de 360°C. La presencia en el agua de vestigios de algunos iones que en condiciones ordinarias serían completamente inofensivos, hace que aumente la corrosión de las aleaciones de circonio a temperatura elevada. En cambio, algunos iones que en condiciones normales activan las reacciones, no influyen prácticamente sobre la corrosión de las aleaciones de circonio a las temperaturas de que se trata. Las diferencias que se observan entre los efectos producidos por los distintos iones se deben a la influencia que ejercen sobre las propiedades de las películas protectoras que se forman en la superficie de las aleaciones de circonio.

S. B. Dalgaard (Canadá) habló de la resistencia a la corrosión de algunas aleaciones de circonio-niobio. Dijo que como esas aleaciones, tratadas térmicamente en forma apropiada, tienen propiedades mecánicas excelentes, se piensa utilizarlas, en vez del Zircaloy, para fabricar los tubos de presión de los reactores de potencia del Canadá.

H. Coriou, L. Grall, J. Neunier, M. Pelras y H. Willermoz (Francia) trataron de la corrosión del Zircaloy en diversos medios alcalinos a temperaturas elevadas, problema que tiene interés por lo que respecta a los reactores de agua a presión. Estos medios alcalinos se emplean para facilitar la filtración de los productos de corrosión, con lo que se consigue disminuir considerablemente la contaminación de los circuitos. Demostraron que existe un "umbral crítico" de las concentraciones del óxido de litio más allá del cual la corrosión es muy rápida, y que este umbral depende mucho de la temperatura. Para el amoniaco no se ha observado umbral alguno.

La memoria presentada por B. Cox y R. C. Asher (Reino Unido) trataba del efecto de la irradiación en un reactor sobre la oxidación de las aleaciones de circonio. Se han observado variaciones considerables en la formación de las películas de óxido, que dependen de la temperatura y de las características del flujo neutrónico. El crecimiento de las películas delgadas de óxido puede ser atribuido a los rayos gamma.

J. Debuigne y P. Lehr (Francia) estudiaron la cinética de la oxidación del circonio sin alear en una atmósfera de oxígeno seco, a temperaturas comprendidas entre 600 y 850°C. Demostraron que el fenómeno de formación y crecimiento de una película superficial de óxido va acompañado de una difusión considerable del oxígeno en el metal subyacente, lo que aumenta la fragilidad del metal.

J. S. L. Leach y A. M. Nehru (Reino Unido) trataron de los efectos del hidrógeno sobre metales normalmente recubiertos, y más o menos protegidos, por una capa de óxido.

## Problemas que plantean los reactores de tipo avanzado

Como las perspectivas de la energía nucleoelectrónica dependen en gran medida de la posibilidad de desarrollar reactores reproductores, los efectos de corrosión causados por el plutonio fundido empleado como combustible tienen particular importancia. B. J. Thamer, R. P. Hammond, R. M. Bidwell, C. C. Burwell y J. E. Kemme (Estados Unidos) hicieron observar que las aleaciones de plutonio fundidas pueden presentar algunas de las ventajas inherentes a los combustibles líquidos combinados con las elevadas relaciones de reproducción que es posible obtener con los reactores de plutonio rápidos. Sin embargo, para poderlas utilizar es necesario encontrar un material adecuado para los recipientes. J. R. Weeks y C. J. Klamut (Estados Unidos) examinaron los aspectos teóricos de la corrosión originada por metales líquidos.

Por lo que respecta a los reactores de potencia, se considera que el concepto más prometedor es el de un reactor con el combustible distribuido homogéneamente en fluoruros fundidos. Para el reactor experimental de sal fundida del Oak Ridge National Laboratory (Estados Unidos) se ha estudiado una aleación de gran resistencia a base de níquel. J. H. De Van y R. B. Evans (Estados Unidos) expusieron los resultados de varios ensayos llevados a cabo para demostrar la excelente resistencia de este material a la corrosión por fluoruros fundidos a temperatura elevada.

Durante algún tiempo se ha considerado muy conveniente utilizar litio como refrigerante en los reactores de potencia. J. R. Di Stefano y E. E. Hoffman (Estados Unidos) presentaron los resultados de algunos experimentos realizados con objeto de determinar la compatibilidad de varios materiales de construcción de recipientes con el litio fundido.

Los reactores con moderador y refrigerante orgánicos ofrecen especial interés debido a que los líquidos orgánicos poseen propiedades físicas y químicas mejores que las del agua. Una de ellas es el poco efecto corrosivo de los líquidos orgánicos cuando se emplean con materiales corrientes y con combustibles nucleares metálicos.

W. E. Parkins (Estados Unidos) describió los efectos de la corrosión por los refrigerantes orgánicos y dio los resultados de ensayos efectuados con diversos tipos de acero, aluminio, circonio y magnesio, y con algunas de sus aleaciones. Estos resultados demuestran que todos los materiales ensayados son esencialmente inertes con respecto a los refrigerantes orgánicos en estado de pureza; la corrosión sólo se produce como resultado de la presencia de ciertas impurezas. Pequeñas cantidades de agua disuelta producen efectos corrosivos muy graves sobre el magnesio, y el hidrógeno afecta seriamente al circonio. Las radiaciones no incrementan la velocidad

de corrosión, pero forman hidrógeno libre y ciertas sustancias orgánicas que, a su vez, pueden reaccionar con el oxígeno para formar compuestos corrosivos.

### Otros procedimientos - Recapitulación

P. J. Gellings (Países Bajos) presentó un procedimiento que permite estudiar en el interior mismo del reactor la corrosión de probetas e incluso de los mismos materiales que componen el reactor. La memoria presentada por J. A. Ayres (Estados Unidos) trataba de la descontaminación de los reactores o de partes de su circuito primario. En esencia, la descontaminación es un proceso de corrosión controlado, en cuyo curso se elimina la película junto con una pequeña cantidad del metal subyacente. Si se añaden inhibidores adecuados se evita que la corrosión sea excesiva. Esta corrosión proviene no sólo directamente del proceso de descontaminación sino también de que, más tarde, durante el funcionamiento, aumenta la intensidad del ataque a consecuencia de la eliminación de la película protectora.

En su recapitulación de los debates, M. J. Brabers, presidente de la última sesión, dijo lo siguiente:

"En general, los resultados obtenidos en diversos países concuerdan o se complementan satisfactoriamente. Se ha logrado mejorar considerablemente la resistencia a la corrosión de los materiales para reactores; por ejemplo, hace algunos años se consideraba que 150°C era la temperatura máxima para

las aleaciones de aluminio. Esta semana se ha hablado ya de 350°C, lo que representa un aumento, bastante considerable, de 200 grados. También se ha logrado mejorar las aleaciones de circonio. Se ha hecho referencia a los efectos beneficiosos del niobio y del cobre. Dados los enormes efectos de los tratamientos térmicos ignoramos si el aumento del contenido en niobio mejorará, en ese caso, la resistencia a la corrosión. Si esa resistencia sigue aumentando como hasta ahora es muy posible que dentro de varios años el factor determinante en la energía atómica no sea ya la corrosión de los materiales sino sus aspectos mecánicos. En el caso del aluminio es posible que se haya llegado ya a este punto, pero estoy seguro de que se alcanzarán temperaturas más elevadas. La irradiación puede ejercer muchos efectos: alteraciones de la estructura, dislocaciones, etc. Los datos presentados a este respecto no han sido muy abundantes, pero, como se ha indicado, la corrosión es difícil de comprender incluso sin que intervenga la irradiación. Con la irradiación, el problema se complica mucho."

En su discurso de clausura, Cestmir Simáne, Director de la División de Suministros Técnicos del OIEA, hizo observar que las memorias relativas a los aspectos tecnológicos revelaban mayores progresos que las de carácter teórico. Dijo que la Conferencia había puesto de manifiesto lo poco que en realidad se sabe sobre el fenómeno de la corrosión, pero agregó que el hecho de que los especialistas se den cuenta de la limitación de sus conocimientos es ya un factor importante de progreso.