DAÑOS PROVOCADOS POR LAS RADIACIONES EN LOS SOLIDOS Y EN LOS MATERIALES PARA REACTORES

La física del estado sólido, que hace 20 ó 25 años apenas se consideraba una rama independiente de la ciencia, constituye hoy una disciplina sumamente activa en rápida expansión. Este gran impulso se debe a las condiciones cada vez más rigurosas que impone a los materiales la tecnología moderna. Quizá sea la tecnología nuclear donde más claramente se manifiesta esta tendencia, pues la necesidad de obtener en esa esfera ciertas combinaciones óptimas de propiedades físicas ha hecho precisa una revisión casi completa de los materiales y sus propiedades, tanto desde el punto de vista teórico como tecnológico. Una de las exigencias más importantes que impone este tipo de aplicaciones es enteramente nueva: la estabilidad ante las radiaciones. Para que un material pueda ser utilizado en el interior de un reactor nuclear tiene que ser capaz de resistir durante largo tiempo no solamente altas temperaturas, sino también flujos intensos de radiaciones nucleares de elevada energía.

Las partículas nucleares que atraviesan los materiales de un reactor ceden parte de su energía a los átomos de esos materiales y desplazan algunos de ellos de la posición que normalmente ocupan. El resultado cumulativo se manifiesta en alteraciones importantes de las propiedades físicas del material irradiado. Estas propiedades son, entre muchas otras, sus dimensiones, resistencia, dureza, conductividad térmica y eléctrica, magnetismo y resistencia a la corrosión. A causa de esas alteraciones es preciso conocer la vida útil de todo material que se piense emplear en tecnología nuclear, lo cual sólo es posible investigando los daños que en él provocan las radiaciones.

En razón de la importancia que tiene para la tecnología nuclear conocer el mecanismo de esos daños, el Organismo Internacional de Energía Atómica celebró del 7 al 11 de mayo de 1962 en Venecia (Italia), un Simposio sobre daños provocados por las radiaciones en los sólidos y en los materiales para reactores.

Asistieron a él más de 200 hombres de ciencia de Alemania, Austria, Bélgica, Canadá, Checoeslovaquia, Dinamarca, España, Estados Unidos, Francia, Grecia, Hungría, Italia, Japón, Noruega, Países Bajos, Pakistán, Polonia, Portugal, Rumania, Reino Unido, Sudáfrica, Suecia, Suiza, Unión Soviética y Yugoeslavia, así como del EURATOM. Se presentaron unas 90 memorias, 38 de las cuales se expusieron por separado, siendo las restantes examinadas por grupos de expertos. Las memorias se referían a los siguientes temas de investigación: teoría general, metales puros, combustibles nucleares metálicos y cerámicos, grafito y óxido de berilio, sustancias moderadoras, daños provocados por las radiaciones en semiconductores, cristales iónicos y otros cristales no metálicos, y técnicas especiales.

Teoría general: Daños provocados por las radiaciones en los metales y sus aleaciones

En la primera sesión del Simposio físicos teóricos examinaron los procesos básicos de los daños provocados por las radiaciones y sus efectos sobre los sólidos y otros materiales. Las deliberaciones pusieron de relieve que en los últimos años han progresado notablemente los conocimientos sobre los efectos de los choques interatómicos en los sólidos, aunque son menester nuevos trabajos teóricos para conocer plenamente la naturaleza y el mecanismo de estos efectos.

S. V. Starodubtsev (Unión Soviética) presentó una memoria acerca de la analogía entre los efectos que ejercen sobre los sólidos las radiaciones nucleares y los flujos de partículas cargadas lentas, y destacó que los problemas inherentes a las alteraciones de las propiedades físicas de diversos materiales al ser irradiados adquieren cada vez más importancia. Describió algunos experimentos para mostrar que los fenómenos radiofísicos suelen estar relacionados con los de electrónica catódica. Basándose en estos experimentos, el Profesor Starodubtsev sugirió un programa para estudiar a base de modelos los efectos de las radiaciones de los reactores en los materiales.

J. R. Beeler y D. G. Besco (Estados Unidos) presentaron una memoria en la que describían el empleo de una calculadora IBM para estudiar los daños provocados por las radiaciones; J. Lindhard y P. V. Thomsen (Dinamarca) examinaron los efectos de los electrones y otras partículas nucleares.

Otras tres memorias presentadas por científicos de Bélgica, Estados Unidos y Rumania trataban de algunos otros aspectos de la teoría general de los daños provocados por las radiaciones.

Se dedicaron dos sesiones del Simposio a los daños provocados en metales puros, y una a los provocados en aleaciones.

Al discutir la naturaleza de los daños provocados en los metales, A. Seeger (República Federal de Alemania) dijo que los trabajos realizados en los últimos tres años confirman la imagen de los daños

provocados por neutrones rápidos que él mismo presentó en 1958, en la segunda Conferencia Internacional sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos. La microscopía electrónica de transmisión y las mediciones ferromagnéticas han permitido obtener más datos sobre los daños provocados por las radiaciones. Recientemente se han efectuado trabajos considerables sobre el endurecimiento por irradiación y sobre la deformación plástica de monocristales endurecidos por irradiación. Seguidamente, el Profesor Seeger examinó ciertos aspectos de los daños que sufren los metales nobles y el níquel al ser irradiados con electrones y neutrones rápidos.

R. O. Simmons, J. S. Koehler y R. W. Balluffi (Estados Unidos) comunicaron que el bombardeo de metales puros por partículas de elevada energía origina diversos defectos, y como la mayoría de éstos son de dimensiones atómicas, su estudio por observación directa es hasta ahora muy poco completo. La presencia de estos defectos atómicos en un metal altera muchas de sus propiedades físicas, tales como la resistividad eléctrica, la densidad, la energía acumulada y las características de elasticidad e inelasticidad. En general, según los autores, se efectúan experimentos de dos tipos para estudiar los defectos producidos por irradiación y, por lo tanto, los mecanismos atómicos determinantes de los fenómenos observados en metales irradiados. En primer lugar cabe comparar la frecuencia y el tipo de los defectos que prevé la teoría para una radiación determinada, con las alteraciones de las propiedades físicas observadas experimentalmente. Este método ha sido muy útil en el caso de la irradiación electrónica. En segundo lugar, puede procederse al recocido térmico (con enfriamiento regulado muy lento) de un metal después de irradiarlo, para medir las modificaciones de sus propiedades físicas a diferentes intervalos de temperatura. Este método ha sido sumamente provechoso a temperaturas muy bajas. Los autores se refirieron al gran número de investigaciones realizadas para estudiar los daños provocados por las radiaciones en la estructura cristalina de los metales, y a las repetidas tentativas de identificar los defectos atómicos y los mecanismos determinantes. Si bien la teoría proporciona una orientación general para la interpretación de los hechos, gran parte de las explicaciones tienen desgraciadamente carácter particular. Muchas de las dificultades sólo podrán resolverse cuando se posean conocimientos más precisos sobre los defectos más simples provocados en los metales.

En una memoria sobre fragilización de metales por efecto de la irradiación neutrónica, presentada conjuntamente por A. A. Johnson (Reino Unido), la señora N. Milasin (Yugoeslavia) y F. N. Zein (RAU), los autores señalaron que los experimentos realizados en este campo hasta hoy son de tres tipos principales. En primer lugar, se ha intentado observar directamente por microscopía electrónica los daños provocados por las radiaciones. Este método se ha aplicado al hierro y al molibdeno, pero se ha observado que estos metales sufren daños en una escala

Sesión inaugural del Simposio de Venecia. De izquierda a derecha: el Dr. Henry Seligman, Director General Adjunto de Investigaciones e Isótopos del OIEA; el Dr. Vittorio Branca, de la Fondazione Cini; el Sr. Manfredo de Bernart, Prefecto de Venecia; el Dr. Sigvard Eklund, Director General del OIEA; el Sr. Favaretto Fisco, Alcalde de Venecia y el Prof. Arkadij Rylov, Director General Adjunto de Formación e Información Técnica del OIEA

tan diminuta que supera al poder de resolución del microscopio. En segundo lugar, se ha procurado deducir la naturaleza de los daños por las alteraciones de las propiedades mecánicas que originan. Este método se ha empleado mucho, pero su eficacia es limitada por no conocerse a fondo las propiedades mecánicas de los metales irradiados. Finalmente, se han medido las alteraciones de las propiedades físicas, por ejemplo de la resistividad eléctrica, y se ha estudiado su recuperación al calentar el metal irradiado por encima de la temperatura de irradiación. Según los autores, esta técnica es especialmente útil para estudiar los defectos provocados por la irradiación en la estructura cristalina. Examinaron y compararon los resultados publicados sobre experimentos de estos tres tipos y describieron una serie de mediciones en las que se han aplicado los tres métodos para estudiar el comportamiento del molibdeno irradiado cuando se calienta a temperaturas comprendidas entre 100° y 300°C, aproximadamente.

Otras memorias presentadas por científicos de Alemania, Bélgica, Estados Unidos, Francia, Reino Unido, Rumania y la Unión Soviética estaban dedicadas a diversos aspectos de los daños provocados por las radiaciones en metales puros.

Refiriéndose a los daños provocados en las aleaciones, A. C. Damask (Estados Unidos) dijo que en este caso tenía especial importancia regular el tipo y la distribución de los defectos, porque todo estado termodinámico de una aleación se caracteriza por la relación de posición que existe entre sus átomos. El Sr. Damask examinó la manera de alterar esta relación por bombardeo con partículas pesadas.

L. M. Howe (Canadá) presentó una memoria sobre daños por irradiación del circonio, del Zircaloy-2 y del acero inoxidable; señaló que los materiales más adecuados para revestir elementos combustibles y construir tubos de presión son las aleaciones de circonio porque reúnen las mejores condiciones en cuanto a resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, economía neutrónica y facilidad de elaboración. Dijo que en los reactores canadienses NPD (Nuclear Power Demonstration) y CANDU (Canadian Deuterium Uranium) se utilizaría Zircaloy-2 y una aleación de circonio que contiene estaño y hierro, y níquel y cromo combinados. Los tubos de presión de estos reactores trabajarán a temperaturas próximas a las del refrigerante a presión que circula por ellos; su resistencia ha de ser, pues, suficiente para contener al refrigerante, y debe mantenerse durante mucho tiempo a pesar de las elevadas temperaturas y de la irradiación neutrónica. Se ha realizado una serie de experimentos de irradiación para mejorar las propiedades mecánicas del Zircaloy-2. Los resultados demuestran que en algunos casos mejoran ciertas propiedades de la aleación como la resistencia a la tracción y el límite de elasticidad. Otra finalidad de los experimentos fue obtener información sobre el mecanismo de endurecimiento por irradiación del Zircaloy-2 y del circonio.

M. S. Wechsler y R. H. Kernohan (Estados Unidos pasaron revista a los trabajos realizados en el Oak Ridge National Laboratory sobre los efectos de las radiaciones en aleaciones a base de cobre. Dichas investigaciones han puesto de manifiesto que la irradiación con neutrones, electrones o rayos gamma activa algunas reacciones que se producen en las aleaciones, así como las condiciones en que las aleaciones irradiadas podrían ser inestables, lo que tiene importancia para el empleo de materiales estructurales en ambientes expuestos a las radiaciones.

Algunas de las memorias sobre este tema presentadas por científicos de Austria, Estados Unidos, Francia, Italia y la Unión Soviética describieron los trabajos experimentales realizados con diversas clases de acero, metal en el que los efectos de las radiaciones sobre las propiedades mecánicas tienen verdadera importancia desde el punto de vista tecnológico por la frecuencia con que se emplea como material estructural o para construir vasijas de presión.

Materiales fisionables, sustancias moderadoras, semiconductores

El Simposio pasó después revista al estado actual de los conocimientos sobre los efectos de la irradiación en los materiales más importantes para la construcción de reactores: esto es, los propios combustibles nucleares en forma de uranio metálico o de compuestos cerámicos de uranio y carbono u oxígeno. Para ello se organizó la reunión de un grupo de expertos en la que A. Herpin (Francia), hizo un estudio de conjunto de nueve memorias presentadas por participantes de Estados Unidos, Francia, India, Reino Unido y la Unión Soviética. Los fenómenos más importantes que se estudiaron fueron el agrietamiento y el crecimiento del uranio sometido a irradiación y la difusión y precipitación de gases raros en metales fisionables irradiados y no irradiados.

En otra reunión de expertos, W. E. Roake (Estados Unidos) presentó un estudio de conjunto sobre daños provocados por las radiaciones en los combustibles nucleares cerámicos.

Se estudió el comportamiento ante las radiaciones de combustibles compuestos de una aleación de uranio-carbono sometidos a grados bajos y altos de combustión, y los efectos de la irradiación a baja temperatura sobre el carburo de uranio fundido. La discusión se basó en siete memorias presentadas por científicos de los Estados Unidos, Francia, Países Bajos y el Reino Unido en las que se describían las últimas investigaciones realizadas.

Otro de los importantes problemas discutidos en el Simposio fue el de los daños provocados por las radiaciones en moderadores como el grafito y el óxido de berilio. Las deliberaciones del grupo de expertos, ante el que J. H. W. Simmons (Reino Unido) presentó un estudio de conjunto sobre el grafito, mostraron que en los últimos años se han logrado grandes progresos en el conocimiento de los fenómenos de deterioración del grafito provocados por las radiaciones.

En una memoria sobre los daños causados por la radiación al óxido de berilio, G. W. Keilboltz, J. E. Lee Jr., R. R. Shields y W. E. Browning Jr. (Estados Unidos) señalaron que, dadas las interesantes propiedades nucleares del óxido de berilio y sus excelentes cualidades como material cerámico para temperaturas elevadas, conviene estudiar la posibilidad de emplearlo como moderador o reflector en varios reactores de potencia de los Estados Unidos y de otros países. Para que su uso resulte racional y económico es preciso que el material soporte dosis integradas de neutrones muy elevadas. Los autores describieron experimentos que se realizan actualmente para determinar los mecanismos específicos de los daños observados y establecer los parámetros óptimos para la construcción y el buen funcionamiento de reactores moderados con óxido de berilio.

Aunque bastan irradiaciones relativamente breves en los reactores para producir efectos apreciables en los metales, éstos son todavía más aparentes en otros materiales, especialmente en los semiconductores como el germanio.

En una sesión especial del Simposio, P. Baruch (Francia) leyó un estudio de conjunto sobre los daños provocados por las radiaciones en los semiconductores, al que siguió una discusión por un grupo de expertos basada en ocho memorias presentadas por científicos de los Estados Unidos, Francia, Grecia, Polonia y Rumania.

J. W. MacKay y E. E. Klontz (Estados Unidos) señalaron que la cantidad de defectos que se producen en los semiconductores depende en grado sumo de la temperatura de irradiación. Así lo han demostrado

los experimentos efectuados por los autores para estudiar el mecanismo de los daños provocados por las radiaciones en el germanio.

P. Baruch y J.C. Pfister (Francia) presentaron un minucioso informe sobre experimentos realizados para estudiar los efectos de las radiaciones en la difusión de impurezas (como el galio, el boro y el fósforo) en semiconductores.

En otra discusión por un grupo de expertos, celebrada durante la misma sesión, E. L. Andronikashvili (Unión Soviética) presentó un estudio de conjunto de siete memorias relativas a los daños provocados por las radiaciones en los cristales iónicos y en otros cristales no metálicos, redactadas por participantes de Italia, Japón, Polonia, República Federal de Alemania, Rumania y la Unión Soviética.

Una de estas memorias, presentada por K. Heine, G. B. Schmidt y W. Herr (Alemania), puso de relieve que también los aspectos químicos son importantes para explicar los daños provocados por las radiaciones en cristales iónicos.

En una memoria acerca del efecto de la irradiación neutrónica sobre materiales magnéticos empleados en las técnicas nucleares, E. Lambusca, N. Andreescu y C. Motoc (Rumania) describieron experimentos que les han ayudado a determinar las condiciones de empleo de algunos de esos materiales en dispositivos que han de funcionar en campos de radiación.

Técnicas especiales

En la última sesión del Simposio, científicos de Estados Unidos, Francia, Japón, Reino Unido, Rumania y la Unión Soviética presentaron siete memorias sobre técnicas y métodos especiales para estudiar los daños provocados por las radiaciones.

R. R. Coltman (Estados Unidos) describió un criostato refrigerado por helio que, instalado cerca de la zona central del reactor moderado con grafito de Oak Ridge, le ha permitido estudiar los daños provocados por las radiaciones a las temperaturas bajísimas del helio líquido. Con ayuda de ese aparato estudió también la resistividad eléctrica, la liberación de energía acumulada, la alteración de la longitud, el esfuerzo de fluencia y otras propiedades. El Sr. Coltman dijo que empleando diversas configuraciones de combustible en el reactor alrededor del criostato, y un blindaje movible en torno a las muestras, pudo estudiar con entera independencia los daños producidos por los neutrones térmicos, rápidos y de fisión. Se refirió en particular a los daños provocados por los rayos gamma que emiten las muestras mismas al capturar neutrones térmicos. También examinó la importancia de las mediciones de este tipo para comprender los mecanismos fundamentales de los daños producidos por las radiaciones.

V. E. Goldansky (Unión Soviética) describió el método llamado de soldadura nuclear por puntos y algunas de sus aplicaciones. Dijo que la emisión de partículas pesadas cargadas, que ocurre en algunas reacciones nucleares, produce un calentamiento intenso en los microvolúmenes del material situado en el trayecto de las partículas. Si se introducen en la capa de separación de dos materiales elementos que reaccionen de esta manera, como el litio o el boro, y se irradian seguidamente con neutrones térmicos, se produce el calentamiento de un gran número de estos microvolúmenes en la superficie de contacto y se logra la "soldadura nuclear por puntos" -que origina una unión muy fuerte de ambos materiales con un efecto radioquímico relativamente débil. El Sr. Goldansky dijo que las posibilidades de este método se demostraron por primera vez al soldar polímeros y otros materiales. Más tarde se ha empleado para consolidar la unión de superficies de caucho y ciertos tejidos. Los resultados han mostrado que las fuerzas de unión llegan a ser hasta cuatro veces mayores que las alcanzadas por otros métodos.

Los participantes celebraron también reuniones oficiosas para cambiar impresiones sobre los problemas actuales más importantes y examinar los métodos experimentales y teóricos que pudieran servir para resolverlos. Ello les ayudó a fijar las direcciones en que podrían orientarse los programas de investigación.

Actuaron como presidentes de las sesiones del Simposio o de las discusiones por grupos de expertos los siguientes científicos: Profesor A. Seeger (Alemania), Dr. H. G. Van Bueren (Países Bajos), Profesor S. V. Starodubtsev (Unión Soviética), Profesor E. W. J. Mitchell (Reino Unido), Dr. E. Nagy (Hungría), Dr. A. Herpin (Francia), Dr. W. E. Roake (Estados Unidos), Dr. J. H. W. Simmons (Reino Unido), Dr. W. Kosiba (EURATOM), Profesor P. Baruch (Francia), Profesor E. Andronikashvili (Unión Soviética) y Dr. L. Giulotto (Italia).