

Mgr inż. IRENEUSZ NATKANIEC

Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie

WPLYW PROMIENIOWANIA NA MATERIAŁY NIEROZSZCZEPIALNE

O przydatności materiałów nierozszczepialnych w technice jądrowej w dużym stopniu decyduje ich zachowanie się w polu promieniowania jądrowego. Zachowanie to jest uzależnione od rodzaju i energii promieniowania, mocy i sumarycznej dawki promieniowania oraz własności fizykochemicznych rozpatrywanego materiału. W referacie przedstawiono pokrótce współczesne wiadomości o mechanizmie powstawania uszkodzeń radiacyjnych i obserwowanych w wyniku napromieniowania zmianach własności materiałów takich jak: metale, stopy, półprzewodniki, grafit, związki jonowe i związki molekularne. Obserwowane zmiany własności fizykochemicznych materiałów o budowie krystalicznej są wynikiem uszkodzeń strukturalnych powodowanych przez promieniowanie. Biorąc pod uwagę rodzaj promieniowania omówiono głównie uszkodzenia powodowane przez neutrony i promieniowanie gamma. W praktyce bowiem na tego rodzaju promieniowanie o dużym natężeniu narażone są materiały nierozszczepialne pracujące w strefie aktywnej reaktorów jądrowych.

Na ogół mechanizm powstawania uszkodzeń strukturalnych jest następujący: szybki neutron przez zderzenia sprężyste wybija atomy z położeń równowagi w węzłach sieci krystalicznej. Ponieważ energia potrzebna do tego jest rzędu 10-30 eV, a energia pierwotnie wybitego atomu jest na ogół znacznie większa powoduje on dalsze przemieszczenia sąsiednich atomów z położeń równowagi. Proces ten (displacement spike) zachodzi lawinowo, aż ostatnie atomy wybite z położeń równowagi będą miały energię mniejszą od energii aktywacji następnych atomów. Energia tracona przez neutron w zderzeniach zostaje szybko zamieniona na energię drgań cieplnych atomów. W wyniku tego wytwarza się w małym obszarze bardzo wysoka temperatura (thermal spike). Oszacowano, że taki "szczyt termiczny" obejmuje 5000 - 10 000 atomów, i że przez okres rzędu 10^{-10} - 10^{-11} sek utrzymuje się w nim

temperatura w granicach 700 - 1200°C. W tak wysokiej temperaturze należy oczekiwać powstania uszkodzeń sieci spowodowanych lokalnym stopieniem lub wyparowaniem materiału.

Wynikiem tych procesów jest to, że pewna liczba położeń równowagi w sieci krystalicznej pozostanie nie obsadzona, a wybite atomy pozostaną w położeniach międzywęzłowych. Liczba atomów wybitych z położeń równowagi zależy od wielkości strat energii na wzbudzenia elektronowe przez pierwotnie wybite atomy. Orientacyjnie, neutron o energii 2 MeV powoduje w berylu średnio 450 wybić, a dla glinu średnio 6030. Przy dużej gęstości uszkodzeń liczby te nie odpowiadają ilości uszkodzeń sieci, gdyż część z przemieszczonych atomów zajmie wolne położenia w stanie równowagi.

Naświetlanie neutronami może spowodować w wyniku reakcji (n, γ) a następnie rozpadu beta powstanie atomów zanieczyszczeń w pierwotnej sieci. Biorąc jednak materiał o małym przekroju czynnym na wychwyty neutronów można zaniedbać wpływ tego rodzaju zmian na dalsze jego własności, tym bardziej, że w wyniku tego procesu powstaje tylko jedno uszkodzenie sieci.

Ilościowy wpływ uszkodzeń strukturalnych na własności fizykochemiczne materiałów uzależniony jest od szybkości procesów migracji i rekombinacji uszkodzeń. Procesy te zmieniają liczbę i typ defektów sieci. Wykazują one silną zależność od temperatury, energii aktywacji i typu sieci krystalicznej. Teoretycznie trudno jednak uwzględnić wszystkie czynniki warunkujące te procesy, tak że dokładne wiadomości o zmianach własności zachodzących pod wpływem promieniowania otrzymujemy tylko z doświadczeń. Można tu podać krótkie zestawienie obserwowanych zmian własności fizykochemicznych dla różnych materiałów.

1. Metale

W temperaturach normalnych i wyższych szybkości migracji i rekombinacji uszkodzeń, a w związku z tym szybkość usuwania skutków napromieniowania w metalach jest tak duża, że zmiany ich własności są bardzo nieznaczne. Przy ustalonym strumieniu neutronów i ustalonej temperaturze skutki napromieniowania osiągają szybko stan "nasylenia". W niskich temperaturach zaznacza się jednak wyraźny wpływ promieniowania na własności czystych metali, polegający na:

- wzroście oporności elektrycznej,
- zmniejszeniu przewodnictwa cieplnego,

- niewielkiej zmianie gęstości i wymiarów,
- wzroście twardości i wytrzymałości na rozciąganie.

2. Stopy

Stopy uporządkowane zachowują się w polu promieniowania podobnie jak czyste metale. Stopy nieuporządkowane wykazują znacznie mniejsze zmiany swoich własności. Pod wpływem promieniowania mogą one nawet zwiększać stopień uporządkowania co przejawia się w zmniejszeniu ich oporności właściwej. Przykładem może tu być stop miedź - glin, który w strumieniu szybkich neutronów bardzo wyraźnie zmniejsza opór właściwy.

3. Półprzewodniki

Własności półprzewodników zależą bardzo od typu i koncentracji zanieczyszczeń. Promieniowanie neutronowe powoduje trwałe zmiany ich własności polegające na zmianie oporności lub nawet typu przewodnictwa. Tak np. german typu - n w wyniku napromieniowania neutronami szybkimi zmienia się na german typu - p. Pod wpływem promieniowania gamma następują przejściowe zmiany własności zanikające po usunięciu z pola promieniowania. Polegają one na zmniejszeniu oporności w wyniku generacji nośników i skróceniu czasu życia nośników mniejszościowych.

4. Grafit

Skutki napromieniowania grafitu wykazują bardzo silną zależność od temperatury, w której ono zachodzi. W wyniku napromieniowania następuje zmniejszenie przewodnictwa cieplnego i elektrycznego. Np. pod wpływem dawki 10^{21} neutronów szybkich na cm^2 w temperaturze 30°C przewodnictwo cieplne zmniejsza się 16 razy a w temperaturze 125°C tylko 7 razy. Obserwujemy także zmiany wymiarów oraz sprężystości. Zmiany te można usunąć przez wygrzanie grafitu w wyższej temperaturze. Proces ten musi być jednak prowadzony bardzo ostrożnie, bowiem energia przekazana do grafitu przez promieniowanie jest w nim magazynowana przez atomy umieszczone w poźycjach międzywęzłowych. Ilość zmagazynowanej energii

jest tym większa, im w niższej temperaturze odbywało się napromieniowanie. Po osiągnięciu pewnej temperatury krytycznej energia ta jest gwałtownie wydzielana w postaci ciepła, co prowadzi do bardzo znacznego niekontrolowanego wzrostu temperatury.

5. Związki jonowe

Uszkodzenia radiacyjne w materiałach tego typu są znacznie bardziej widoczne niż w przypadku metali. Zmiany własności charakteryzują się:

- zwiększeniem przewodnictwa elektrycznego kryształów,
- zmniejszeniem przewodnictwa cieplnego,
- powstawaniem centrów barwnych, co prowadzi do zabarwienia kryształów,
- pojawieniem się pasm absorbcyjnych w obszarze nadfioletu i widma widzialnego,
- zwiększeniem kruchości i zmniejszeniem modułu Younga,
- zmniejszeniem gęstości.

Stopień tych zmian maleje ze wzrostem temperatury materiału i przez wygrzanie go uszkodzenia te mogą zostać usunięte.

6. Związki molekularne

Do tego typu związków należą: gazy, ciecze i związki organiczne. Atomy molekuł tych związków związane są słabymi siłami wymiany elektronów między sobą. Większe kompleksy wiązane są międzymolekularnymi siłami Van der Waalsa. Mechanizm uszkodzeń radiacyjnych związków molekularnych jest całkiem inny od rozważanego dotychczas. Przesunięcia atomów w wyniku zderzeń są bardzo mało ważne w stosunku do uszkodzeń spowodowanych przez jonizację i wzbudzenia elektronowe. Promieniowanie gamma powoduje jonizację przez szybkie elektrony, a neutrony przez jądra odrzutu gdyż związki te zbudowane są głównie z pierwiastków lekkich. Energia jonizacji jest zwykle większa niż energia wiązania molekuł, która jest rzędu kilku eV. Wynikiem początkowej jonizacji czy wzbudzenia elektronowego jednej z molekuł jest więc zerwanie wiązań chemicznych w kilku innych. Tworzą się przy tym wolne atomy i rodniki charakteryzujące się dużą aktywnością chemiczną.

Przy ich rekombinacji powstają nowe połączenia między molekułami, oraz całkiem inne związki chemiczne niż pierwotne. Oczywiście powoduje to bardzo radykalne zmiany własności napromieniowanego materiału. Skutki tego napromieniowania są na ogół proporcjonalne do dawki promieniowania i mało zależą od jego rodzaju. Najważniejsze z nich, to:

- zmiany własności mechanicznych,
- zmiana zabarwienia,
- zmiany własności izolacyjnych,
- wydzielanie produktów gazowych.

Naszkiecowane tu zmiany własności różnych materiałów zostaną omówione dokładniej na przykładach konkretnych materiałów z uwzględnieniem ich stosowalności w technice jądrowej.