

# SIMULAÇÃO DE DANOS DA RADIAÇÃO NOS MATERIAIS USADOS PARA REVESTIMENTOS DE COMBUSTÍVEL E ESTRUTURAS DE REATOR

Alexei Kuznetsov, José R. Maiorino, Georgi Lucki e José A. Perrotta

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN  
Caixa Postal 11 049  
05422-970, São Paulo, Brasil

## RESUMO

A caracterização do comportamento dos materiais estruturais empregados no ambiente de irradiação é um dos principais elementos no projeto de reatores. A metodologia de análise de danos da radiação em um ambiente de irradiação determinado e o problema de simulação de danos neste ambiente por meio das instalações de irradiação disponíveis são revisados. As condições de simulação realizáveis na prática e aplicabilidade de testes de simulação são destacados.

**Palavras-chave:** danos da radiação, simulação.

## I. INTRODUÇÃO

Os diferentes materiais estruturais atualmente empregados na indústria nuclear mostram alta resistência térmica, mecânica e à corrosão. Contudo, durante 2-3 anos, são submetidos no núcleo do reator à dose de nêutrons acima de 60 DPA (deslocamentos por átomo) e precisam ser trocados. As estruturas fora da zona ativa permanecem de 30 a 40 anos em serviço; são submetidas a doses de cerca de 1 a 20 DPA, mostrando também a degradação essencial devida ao ambiente neutrônico. Levando em conta o enorme impacto econômico, esforços consideráveis são direcionados na mitigação dos efeitos da radiação, na extensão da vida útil dos materiais da zona ativa e na extensão da vida projetada do reator.

Várias instalações de irradiação são usadas para simulação dos efeitos da radiação, tais como: reatores de testes dos materiais, aceleradores de partículas carregadas, etc. [1]. As suas capacidades avaliam-se do ponto de vista da produção da dose de dano, do espectro dos átomos deslocados por choque primário (*primary knock-on atom, PKA*), das taxas de transmutação nuclear, em particular, a taxa de produção do hélio, junto com a exequibilidade do experimento controlado. Neste sentido, as técnicas da irradiação das amostras com feixe iônico têm certas vantagens, em comparação com os experimentos diretos nos reatores, e são amplamente usadas no estudo de danos da radiação e na obtenção dos resultados experimentais. Infelizmente, devido à natureza diferente das partículas, os dados da irradiação com íons não podem ser usados como dados quantitativos de simulação para irradiação com nêutrons. É necessário estabelecer uma metodologia para avaliar os efeitos da radiação em materiais, usando dados acessíveis ou meios acessíveis da irradiação.

Neste trabalho é revisado e sistematizado o problema da simulação de danos da radiação num ambiente determinado por meio das instalações disponíveis com ênfase das condições de simulação realizáveis na prática.

## II. FUNDAMENTOS FÍSICOS DOS EXPERIMENTOS DA SIMULAÇÃO

Do ponto de vista do projeto de reatores, há dois tipos de informação que são necessários: as propriedades dos materiais sob as condições operacionais nominais e o comportamento do material durante o funcionamento no regime limiar.

É claro que os resultados mais representativos do ponto de vista do comportamento dos materiais podem ser obtidos somente em condições reais do reator. Entretanto, devido a certas razões, estes experimentos não permitem obter resultados inequívocos nas pesquisas dos mesmos defeitos quando se usam as fontes idênticas da irradiação. Estas razões são [2,3]:

- diferenças por sua natureza e espectro da energia dos fluxos de irradiação em diferentes reatores;
- condições complicadas da metrologia da irradiação;
- cargas térmicas e mecânicas variáveis;
- dificuldade da pesquisa diferencial da contribuição de numerosos fatores que influem nos processos de dano.

Além disso, a irradiação dos materiais estudados diretamente nos reatores com os fluxos de nêutrons necessários exige um longo tempo do experimento e maiores despesas materiais, em comparação com os métodos rápidos da irradiação iônica em aceleradores.

Na realização dos experimentos de simulação, a questão principal é o estabelecimento da metodologia de análise de danos e correlação da irradiação. Isto subentende: uma exaustiva análise dos efeitos da radiação à luz das diferenças no espectro dos *PKAs*, nas taxas de transmutação e deslocamento que existem entre a irradiação no reator e a irradiação de simulação; o desenvolvimento dos procedimentos de transposição dos dados obtidos nas condições de simulação para serem aplicados nos projetos das instalações nucleares e termonucleares.

São cinco os itens na análise de dano e correlação da irradiação [4,5]:

#### I. Caracterização do ambiente da irradiação.

Isto inclui:

- 1) tipo das partículas incidentes que vai determinar o caráter da interação com a matéria;
- 2) espectro energético que é diretamente relacionado ao espectro dos *PKAs*;
- 3) fluxo que determina a taxa de produção de dano;
- 4) fluxo integrado para escalonar os efeitos da radiação;
- 5) temperatura que determina todos os processos ativados por ela;
- 6) carga externa que junto com a irradiação causa a fluência do material mesmo quando não é observada a fluência por temperatura;
- 7) composição química, estado estrutural e de fase do material irradiado que são os parâmetros procurados para os materiais suficientemente resistentes aos efeitos da radiação.

#### II. Caracterização do estado defeituoso nascente.

Os parâmetros básicos que caracterizam este estado são:

- 1) a taxa de produção dos defeitos:

$$K = \int_{E_2}^{\infty} dE_2 \cdot v(E_2) \int_{E_{1min}}^{\infty} dE_1 \cdot \phi(E_1) \frac{d\sigma(E_1, E_2)}{dE_2} \quad (1)$$

- 2) a função da densidade de distribuição dos defeitos pela energia dos *PKAs* [6,7]:

$$P(E_2) = \frac{v(E_2)}{K} \int_{E_{1min}}^{\infty} dE_1 \cdot \phi(E_1) \frac{d\sigma(E_1, E_2)}{dE_2} \quad (2)$$

- 3) a taxa de produção dos átomos de transmutação:

$$K_p = \int_0^{\infty} dE_1 \cdot \phi(E_1) \cdot \sigma_p(E_1) \quad (3)$$

- 4) a função de correlação das coordenadas de produção do *PKA* [3]:

$$G(\vec{r} - \vec{r}') = \left[ \frac{1}{K^2} \int_{E_2}^{\infty} dE_2 \int_{E_2}^{\infty} dE_2' v(E_2) v(E_2') p(E_2, \vec{r}, E_2', \vec{r}') \right] - 1 \quad (4)$$

onde  $E_1$  é a energia das partículas incidentes;  $E_2$  é a energia dos átomos deslocados por choque primário;  $E_{min}$  é a energia mínima das partículas incidentes que pode criar *PKA*;  $v(E_2)$  é a função de dano;  $\phi(E_1)$  é o espectro

energético das partículas incidentes;  $\frac{d\sigma(E_1, E_2)}{dE_2}$  é a seção de choque diferencial para colisão que tem recuo no intervalo  $dE_2$  à energia  $E_2$ ;  $\sigma_p(E_1)$  é a seção de choque de formação dos produtos das reações nucleares;  $p(E_2, \vec{r}, E_2', \vec{r}')$  é a função de probabilidade de formação do *PKA* com energia  $E_2$  em ponto  $\vec{r}$  e do *PKA* com energia  $E_2'$  em ponto  $\vec{r}'$ ;  $\vec{E}_2$  é a energia do deslocamento.

#### III. Caracterização do comportamento de dano.

A eficiência da produção efetiva dos defeitos e dos aglomerados (*clusters*), a nucleação e o crescimento dos defeitos secundários, o comportamento das discordâncias sob irradiação, a formação das cavidades, a estabilidade dos precipitados, os efeitos da microquímica e todos os efeitos sinérgicos destes fenômenos são exemplos da caracterização do comportamento de dano.

#### IV. Evolução no tempo da microestrutura e microquímica.

#### V. Correlação microestrutura/microquímica - propriedade.

As principais etapas nos experimentos de simulação podem ser formuladas da seguinte maneira:

- análise de danos da irradiação, que é simulada, conforme os itens acima;
- indicação do ambiente da irradiação de simulação que fornece semelhança melhor nos efeitos da irradiação, especialmente nos fenômenos que na escala do tempo de evolução dos danos são de curto prazo;
- correlação das divergências de desenvolvimento da microestrutura defeituosa com as propriedades finais em relação à microestrutura formada em ambiente da irradiação do reator.

As características do estado defeituoso nascente podem ser aceitas como sendo as características confrontadas dos dois tipos de irradiação. As condições da equivalência destes dois tipos de irradiação serão iguais destas características. Mas, nos experimentos de simulação, onde uma das principais tarefas é a diminuição do tempo da obtenção dos resultados, todas estas condições são violadas. A primeira condição contradiz a própria idéia de experimento rápido; a violação da segunda está ligada com a particularidade de interação das diversas partículas com a matéria; a terceira condição complica essencialmente o experimento, exigindo o uso do método de irradiação com multifeixe; a quarta condição é violada na diferente geometria das cascatas produzidas pelos íons. Por isto, baseando-se nos resultados experimentais [3], são usadas as condições mais "flexíveis", a saber:

1. Igualdade da dose de danos.
2. Similaridade dos espectros de *PKAs*.
3. Igualdade da taxa de produção de hélio.
4. Similaridade na distribuição das áreas primárias da cascata e aglomerados iniciais por seu tamanho;
5. Similaridade nos processos de difusão.

**Dose da Irradiação.** Uma variável importante para escalonar os efeitos da radiação é o fluxo integrado. Contudo, o fluxo integrado não é a medida adequada da capacidade das partículas para danificar um material.

Fisicamente, a medida mais justificada para a dose de dano é o número total dos deslocamentos por um átomo do material irradiado (DPA).

Todavia, a comparação dos efeitos da microestrutura que se baseia apenas no conceito do DPA não é uma boa aproximação, pois esta grandeza é calculada da energia total depositada nas colisões nucleares e ignora completamente a diferença na distribuição espacial de produção dos defeitos. Apesar disso, para comparação dos efeitos da radiação em dois espectros de *PKA* similares o número de DPA é razoavelmente bom parâmetro de correlação [8].

**Similaridade dos Espectros dos *PKAs*.** Uma característica da irradiação extremamente importante é o espectro energético dos *PKAs* produzidos. Dele depende fortemente a estrutura defeituosa do material que se forma durante a irradiação e, conseqüentemente, as propriedades deste material.

Foi proposta [7] a função de densidade de probabilidade de produção do defeito por *PKA* com energia  $T$  sob irradiação com partículas tipo  $j$  como sendo a característica confrontada de formação dos defeitos mais conveniente:

$$P_j(T) = \frac{v(T) \left\langle \frac{d\sigma_j}{dT} \right\rangle}{\int_{E_d}^{E_{\max}} dT' v(T') \left\langle \frac{d\sigma_j}{dT'} \right\rangle}, \quad (5)$$

onde  $v(T)$  é função de dano;  $E_d$  é energia do deslocamento;  $E_{\max}$  é a energia máxima do *PKA*. Grandeza  $\langle d\sigma(T,E)/dT \rangle$  é o espectro dos *PKAs* e encontra-se da equação

$$\left\langle \frac{d\sigma}{dT} \right\rangle = \int_{E_{\min}}^{\infty} dE \Phi(E) \frac{d\sigma(T,E)}{dT}, \quad (6)$$

onde  $E$  é a energia das partículas incidentes,  $\Phi(E)$  é o espectro energético das partículas que produz *PKAs* no volume irradiado;  $\frac{d\sigma(T,E)}{dT}$  é seção de choque da produção

*PKA* com energia  $T$  em  $dT$ .

O espectro energético das partículas incidentes  $\Phi(E)$  também depende da distância  $x$  percorrida no material. Portanto, a expressão (5) pode ser escrita como:

$$P_j(T, x) = \frac{v(T) \int_{E_{\min}}^{\infty} dE \Phi(E, x) \frac{d\sigma(T,E)}{dT}}{\int_{E_d}^{E_{\max}} dT' v(T') \int_{E_{\min}}^{\infty} dE \Phi(E, x) \frac{d\sigma(T',E)}{dT'}}. \quad (7)$$

O coeficiente da similaridade dos espectros de *PKA* de dois tipos de irradiação é a área de superposição de duas figuras, limitadas pelas curvas  $P_i$  e  $P_j$ :

$$Z_{ij}(x) = \int_{E_d}^{E_{\max}} dT \min[P_i(T, x), P_j(T, x)]. \quad (8)$$

Esta grandeza mostra qual fração dos átomos deslocados foi produzida nas condições similares e toma valores de  $0 < Z \leq 1$ . O valor  $Z = 1$  corresponde à similaridade ideal. Variando o tipo de irradiação e de espectro  $\Phi(E)$  que, por sua vez, determina-se pela energia das partículas incidentes, pode-se indicar as melhores condições da similaridade.

**A Taxa de Produção do Hélio.** São dois tipos básicos de interação dos nêutrons com os átomos do material que resultam nos efeitos macroscópicos de danos da radiação: 1) deslocamento dos átomos, que cria os defeitos intersticiais e lacunares; 2) transmutações nucleares, que resultam na criação de elementos de impureza, dos quais o mais importante é o hélio.

As altas taxas de produção do hélio vão acelerar a nucleação das cavidades, o que pode levar ao nível inaceitavelmente alto do inchamento. Mais ainda, as taxas aceleradas de produção do hélio vão levar aos maiores fluxos do hélio para contornos de grão, o que causa fragilização via nucleação e crescimento das bolhas nos contornos. A influência do hélio na evolução da microestrutura efetua-se das seguintes maneiras: o hélio pode alterar as taxas de recombinação, aprisionando as lacunas e/ou os átomos intersticiais, e também pode mudar a fração relativa dos diferentes sorvedouros [9].

A taxa de produção do DPA, a taxa de produção do hélio e a razão He/DPA são parâmetros de grande importância na correlação dos efeitos da radiação. Contudo, a dependência dos processos da irradiação destes parâmetros não é simples. É bem conhecido que, para as taxas similares de dano, as diferenças na razão He/DPA levam a mudanças consistentes na microestrutura irradiada [10]. Ao mesmo tempo, foi mostrado que não há variações sistemáticas no fluxo do hélio para contornos de grão e na microestrutura resultante das bolhas nos contornos com variação da razão He/DPA [11]. Evidentemente, o fornecimento da razão He/DPA nos experimentos da simulação, que é similar à razão esperada no reator, não é equivalente para a taxa de produção do hélio examinada. Portanto, o parâmetro mais apropriado para levar em consideração o efeito do hélio nas propriedades do material durante a irradiação é a taxa de produção do hélio, enquanto que a razão He/DPA estabelece um caminho conveniente para caracterizar os diferentes ambientes da irradiação.

**Distribuição das Áreas Primárias da Cascata e Aglomerados Iniciais por seu Tamanho.** Estudos experimentais e por simulação computacional mostram que, no caso da alta energia dos recuos, 2 - 200 keV, os danos gerados de uma cascata são altamente localizados no espaço [12,13]. Isto resulta na grande eficiência de formação dos aglomerados de ambos tipos: aglomerados lacunares e intersticiais. Junto com a assimetria da produção (*production bias*) e a assimetria de aniquilação (*annihilation bias*) na faixa das temperaturas do inchamento, este fenômeno contribui fortemente na formação das cavidades [14].

Infelizmente, não existe um parâmetro único que descreva adequadamente todos os processos da irradiação

induzidos por defeitos, que podem ocorrer sob as condições de danos de cascata.

Foram propostos [8] como parâmetros mais importantes, especialmente para modelos avançados de danos da radiação:

- fator da mistura do deslocamento (*displacement mixing factor*, DMF);
- fração dos defeitos agrupados (*cluster defect fraction*,  $CDF_{i,v}$ );
- fração dos defeitos puntiformes isolados (*isolated point defect fraction*,  $IDF_{i,v}$ ).

Estes parâmetros são definidos como a fração dos deslocamentos produzidos pelo *PKA* isolado, calculados com o auxílio do modelo NRT [15]. Este modelo é uma versão modificada do modelo de Kinchin e Pease e, em geral, aceito como um padrão internacional para cálculo dos deslocamentos nos materiais irradiados.

DMF é definido como o número das substituições, em relação ao NRT-deslocamentos, que ocorreram durante as fases de colisão e de têmpera da cascata.

$CDF_{i,v}$  é definida como a parte dos defeitos, em relação ao NRT-deslocamentos, que “sobreviveu” à recombinação correlata na cascata e inclui os aglomerados móveis como, por exemplo, bi-intersticiais e bi-lacunares, e os aglomerados maiores, imóveis. Subscritos “i” e “v” significam que esta fração em geral não é igual para as lacunas e intersticiais.

$IDF_{i,v}$  é definida como a parte dos defeitos, em relação ao NRT-deslocamentos, que “sobreviveu” à recombinação correlata na cascata e inclui as monolacunares e monointersticiais.

Estes parâmetros dependem fortemente da energia do *PKA* e, em princípio, podem servir como características confrontadas de dois tipos de irradiação. Entretanto, a análise de produção dos defeitos sob as condições de danos de cascata tem que incluir a estabilidade térmica e a mobilidade dos aglomerados, junto com a possibilidade da re-dissolução cascática dos aglomerados existentes. Infelizmente, até agora, a magnitude da fração dos aglomerados móveis lacunares e intersticiais não é conhecida.

Para comparar a eficiência de produção dos aglomerados sob vários tipos de irradiação usam-se a fração dos *PKAs* produzidos com energia menor do que  $T$  e a fração dos defeitos produzidos por todos os *PKAs* com energia menor do que  $T$  [16,6].

A primeira grandeza determina-se pela expressão:

$$F(T) = \frac{1}{\sigma_{E_d}} \int_0^T \left\langle \frac{d\sigma}{dT'} \right\rangle dT' \quad (9)$$

onde  $\left\langle \frac{d\sigma}{dT'} \right\rangle$  é o espectro dos *PKAs*,  $\sigma$  é a seção de choque total de produção do *PKA*,  $E_d$  é a energia do deslocamento e  $T_{max}$  é a energia máxima possível do recuo.

A segunda grandeza determina-se pela expressão:

$$W(T) = \frac{\int_0^T P(T') dT'}{\int_{E_d}^{E_d} P(T') dT'} \quad (10)$$

onde  $P(T)$  é a função de densidade de probabilidade de produção do defeito por *PKA* com energia  $T$ .

Como o número médio dos pares de Frenkel,  $N$ , produzidos pelo *PKA* é a função única da energia  $T$ , as  $F(T)$  e  $W(T)$  podem ser convertidas para  $F(N)$  e  $W(N)$ . Desta maneira, a função  $F(N)$  representa as frações dos aglomerados de todos os tamanhos menor do que  $N$  e a função  $W(N)$  representa as frações dos defeitos que constituem os aglomerados de todos os tamanhos menor do que  $N$ . Contudo, as funções  $F(N)$  e  $W(N)$  não refletem o fato de partição da cascata em algumas subcascatas espacialmente separadas, no caso de alta energia do recuo, e não dão na forma quantitativa a distribuição dos aglomerados dos defeitos pelo seu tamanho.

Recentemente, foi proposto um procedimento de estimativa da formação dos aglomerados dos defeitos nos materiais irradiados com nêutrons [17]. Este procedimento baseia-se na estimativa da função de probabilidade para o *PKA*, com energia  $E_p$ , criar  $n$  aglomerados dos defeitos em um evento de cascata isolado  $P(n, E_p)$  dos experimentos de irradiação com íons. Usando esta função e espectro energético dos *PKAs*  $W(E_p)$  produzidos pelos nêutrons, a distribuição dos aglomerados dos defeitos sob irradiação com nêutrons pode ser avaliada da seguinte expressão:

$$\int W(E_p) P(n, E_p) dE_p \quad , \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Mas, este procedimento subentende a ausência da interação entre as cascatas, e o efeito da interação intercascática exige análise adicional.

**Temperatura da Irradiação.** A condição necessária para similaridade da mudança do estado estrutural e de fase do material, durante a irradiação no reator e no acelerador, é manter a similaridade dos processos de difusão. As taxas de produção dos danos no acelerador são aumentadas em 2-5 ordens de grandeza, o que leva à violação na similaridade dos processos de difusão com as condições do reator.

Os efeitos básicos ligados ao aumento da taxa de danos são: o deslocamento (*shift*) pela temperatura da dependência inchamento-temperatura, a dispersão da estrutura porosa, o aumento da estabilidade térmica das cavidades e anéis lacunares, as mudanças nos processos de transformação de fase (segregação, estabilidade do soluto sólido, dissolução dos precipitados, ordenação-desordenação).

Para a reprodução do inchamento nos materiais, durante o experimento da simulação com a taxa de produção dos defeitos aumentada, é necessário o deslocamento da temperatura em relação à temperatura de operação do reator. Este deslocamento é causado pela necessidade de conservação da relação entre a taxa de produção dos defeitos e a taxa de absorção deles pelos

sorvedouros, para que se possa reproduzir o nível de saturação dos defeitos da irradiação que é simulada.

No caso, quando a difusão é controlada por um mecanismo qualquer, com energia de ativação  $E_m$ , é necessário aumentar a temperatura no experimento de simulação em comparação com a temperatura de operação do reator na grandeza  $\Delta T$  [18],

$$\frac{\Delta T}{T} = \left( 1 - \frac{kT}{E_m} \ln \frac{K_j}{K_n} \right)^{-1} - 1, \quad (12)$$

onde  $K_j$  e  $K_n$  são as taxas de produção dos defeitos no caso de irradiação com íons e com nêutrons respectivamente. A expressão mais rigorosa, aplicável para diferentes regimes do inchamento foi deduzida por Mansur [19].

A associação da mudança da temperatura nos experimentos rápidos da simulação com o deslocamento da temperatura que é necessária para reproduzir o inchamento pode servir como boa aproximação para simular a evolução da microestrutura. Em favor disso, atestam a forte correlação do inchamento com a formação de fases induzidos por radiação [9] e a mesma densidade aproximada das discordâncias nos experimentos de simulação em comparação com os experimentos no reator.

Entretanto, alguns aspectos ligados ao deslocamento da temperatura precisam ser considerados. Os parâmetros da irradiação, tais como temperatura e taxa de dano, nas condições de dano de cascata têm grande influência na taxa efetiva dos defeitos produzidos que contribuem na precipitação dos mesmos, e na densidade dos sorvedouros [8,20]. Isto vai influir no deslocamento da temperatura. Além disso, nos materiais multicomponentes, o mecanismo de difusão caracteriza-se pelo espectro das energias de ativação.

A prática mostra que atingir as condições da similaridade dos processos de difusão é um problema bastante complicado e é indispensável uma teoria, fundamentada fisicamente, para tal correlação.

**Produção do Hidrogênio.** As taxas de produção do hidrogênio nos materiais no ambiente da irradiação do reator são habitualmente maiores em comparação com as taxas de produção do hélio. Apesar disso, o reduzido efeito do hidrogênio nas propriedades dos materiais foi ligado à sua grande mobilidade e, conseqüentemente, à remoção dele em altas temperaturas de operação dos reatores regeneradores rápidos. Existe a preocupação [21] de que a presença do hidrogênio em baixas temperaturas de reatores de água leve pode manifestar-se como influência negativa nas características das ligas. Ainda não foi explorado o efeito sinérgico dos deslocamentos e da produção do hidrogênio. Por isto, as técnicas de irradiação que permitem simultaneamente introduzir o hélio e o hidrogênio são de importância particular.

### III. CONSIDERAÇÕES EXPERIMENTAIS

O estudo do comportamento volumétrico do material está ligado com o volume irradiado da amostra e do ponto

de vista teórico, é necessário ter certos números de grãos na espessura do material examinado. Para algumas técnicas de simulação, a penetração das partículas incidentes é tão pequena que exclui completamente os testes mecânicos dos materiais irradiados. Para as técnicas onde a penetração não é o problema, as taxas limitadas de remoção do calor impõem outras restrições para tamanhos das amostras irradiadas. Por isto, a aplicabilidade dos dados de testes com pequenas amostras tem de ser estudada adicionalmente.

É bem conhecido [22] que os resultados de testes de pós-irradiação podem desviar-se essencialmente dos resultados obtidos nos experimentos *in-situ*. Apesar das dificuldades de condução dos experimentos *in-situ*, especialmente no reator, é preciso dar preferência a estes tipos de testes.

### IV. CONCLUSÃO

A revisão dos aspectos ligados à simulação de danos da radiação, que são produzidos em um ambiente determinado, por meio de instalações de irradiação disponíveis, mostrou que há vários parâmetros de dano que, juntos, determinam os efeitos da radiação no material. A simulação ideal seria o fornecimento de todos estes parâmetros iguais aos parâmetros de dano do ambiente da irradiação simulada.

Na maioria dos casos, a simulação ideal é impossível, ou seja, é impossível reproduzir todos os efeitos da radiação e, conseqüentemente, caracterizar completamente o comportamento do material no ambiente determinado da irradiação. Na prática, durante os testes de simulação, é possível fornecer apenas alguns parâmetros de dano, simultaneamente iguais aos parâmetros correspondentes da irradiação no reator.

O caminho produtivo para simular os danos da radiação com auxílio das instalações disponíveis seria: a simulação da influência dos parâmetros específicos nos processos específicos da radiação e nas propriedades do material; o destaque dos parâmetros que são mais importantes na simulação dos aspectos dados dos efeitos da radiação; e através do estudo dos processos individuais de irradiação, a compreensão de como eles combinam para produzir danos macroscópicos no material.

### REFERÊNCIAS

- [1] ISINO, S., **Implications of Fundamental Radiation Damage Studies in The Research and Development of Materials for a Fusion Reactor**, J. Nucl. Mater., vol. 239, p. 24-33, 1996.
- [2] ULMAIER, H., **The Simulation of Neutron-Induced Mechanical Property Changes by Light Ion Bombardment**, Ann. Chim. Fr., vol. 9, p. 263-274, 1984.

- [3] ZELENSKIY, V.F., NEKLIUDOV, I.M. and CHERNIAEVA, T.P., **Radiation Defects and Swelling of Metals**, Naykova Dymka, Kiev, 1988.
- [4] ISHINO, S. and UROGA, T., **Damage Analysis and Irradiation Correlation**, J. Nucl. Mater., vol. 133/134, p. 78-84, 1985.
- [5] ISHINO, S., **Time and Temperature Dependence of Cascade Induced Defect Production in In Situ Experiments and Computer Simulation**, J. Nucl. Mater., vol. 206, p. 139-155, 1993.
- [6] AVERBACK, R.S., BENEDEK, R. and MERKLE, K.L., **Ion-Irradiation Studies of Damage Function of Copper and Silver**. Physical Review B, vol. 18, p. 4156-4171, 1977.
- [7] GANN, V.V., ROZHKOVA, V.V. and YUDIN, O.V., **Foundations of the Imitation Theory of Reactor Damages of Materials Using Heavy Ions Accelerators**, Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Ser. Fizika Radiatsionnykh Povrezhdenii i Radiatsionnoe Materialovedenie, n. 3 (11), p. 10-15. 1979.
- [8] ZINKLE, S.J. and SIGN, B.N., **Analysis of Displacement Damage and Defect Production under Cascade Damage Conditions**, J. Nucl. Mater., vol. 199, p. 173-191, 1993.
- [9] STOLLER, R.E., **The Influence of Helium on Microstructural Evolution: Implication for DT Fusion Reactors**. J. Nucl. Mater., vol. 174, p. 289-310, 1990.
- [10] PEDRAZA, D.F., MAZIASZ, P.J. and KLUEH, R.L., **Helium Effects on the Microstructural Evolution of Reactor Irradiated Ferritic and Austenitic Steels**, Radiat. Eff. and Defects in Solids, vol. 113, p. 213-228, 1990.
- [11] SINGH, B.N. and FOREMAN, A.J.E., **Some Limitation of Simulation Studies Using the ppm to dpa Ratio as the Helium Generation Rate**, J. Nucl. Mater., vol. 179-181, p. 990-993, 1991.
- [12] MUROGA, T., KITAJIAMA, K. and ISHINO, S., **The Effect of Recoil Energy Spectrum on Cascade Structures and Defect Production Efficiencies**. J. Nucl. Mater., vol. 133/134, p. 378-382, 1985.
- [13] HEINISCH, H.L. and SINGH, B.N., **The Morphology of Collision Cascades as a Function of Recoil Energy**, J. Nucl. Mater., vol. 179-181, p. 893-896, 1991.
- [14] TRINKAUS, H., SINGH, B.N. and WOO, C.H., **Defect Accumulation under Cascade Damage Conditions**, J. Nucl. Mater., vol. 212-215, p. 18-28, 1994.
- [15] NORGETT, M.J.; ROBINSON, M.T. and TORRENS, I.M. **A Proposed Method of Calculating Displacement Dose Rates**, Nucl. Eng. Des., vol. 33, p. 50-54, 1975.
- [16] WIDERSICH, H., **Effects of the Primary Recoil Spectrum on Long-Range Migration of Defects**. Radiat. Eff. and Defects in Solids, vol. 113, p. 97-107, 1990.
- [17] SEKIMURA, N., KANZAKI, Y., OKADA, S.R., MASUDA, T. and ISHINO, S. **Cascade Damage Formation in Gold Under Self-Ion Irradiation**, J. Nucl. Mater., vol. 212-215, p. 160-163, 1994.
- [18] PACKAN, N.H., FARRELL, K. and STIEGLER, J.O., **Correlation of Neutron and Heavy-Ion Damage**, J. Nucl. Mater., vol. 78, p. 143-155, 1978.
- [19] MANSUR, L.K., **Correlation of Neutron and Heavy-Ion Damage**, J. Nucl. Mater., vol. 78, p. 156-160, 1978.
- [20] WOO, C.H., SINGH, B.N. and SEMENOV, A.A., **Recent Advances in the Understanding of Damage Production and its Consequences on Void Swelling, Irradiation Creep and Growth**, J. Nucl. Mater., vol. 239, p. 7-23, 1996.
- [21] GREENWOOD, L.R. and GARNER, F.A., **Hydrogen Generation Arising from  $^{59}\text{Ni}(n,p)$  Reaction and its Impact on Fission-Fusion Correlations**, J. Nucl. Mater., vol. 233-237, p. 1530-1534, 1996.
- [22] SCHROEDER, H., KESTERNICH, W. and ULLMAIER, H., **Helium Effects on the Creep and Fatigue Resistance of Austenitic Stainless Steels at High Temperatures**, Nucl. Eng. and Design/Fusion, vol. 2, p. 65-95, 1985.

## ABSTRACT

The characterization of structural materials behavior in irradiation environment is one of the basic elements in reactor's design. The methodology of damage analysis in a determinate irradiation environment and the problem of the damage simulation by means of the accessible facilities are reviewed. The achievable simulation conditions in practice and applicability of simulation tests are emphasized.