

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Antonio Teixeira e Silva e Claudia Giovedi

Outubro 2023

MÓDULO 4

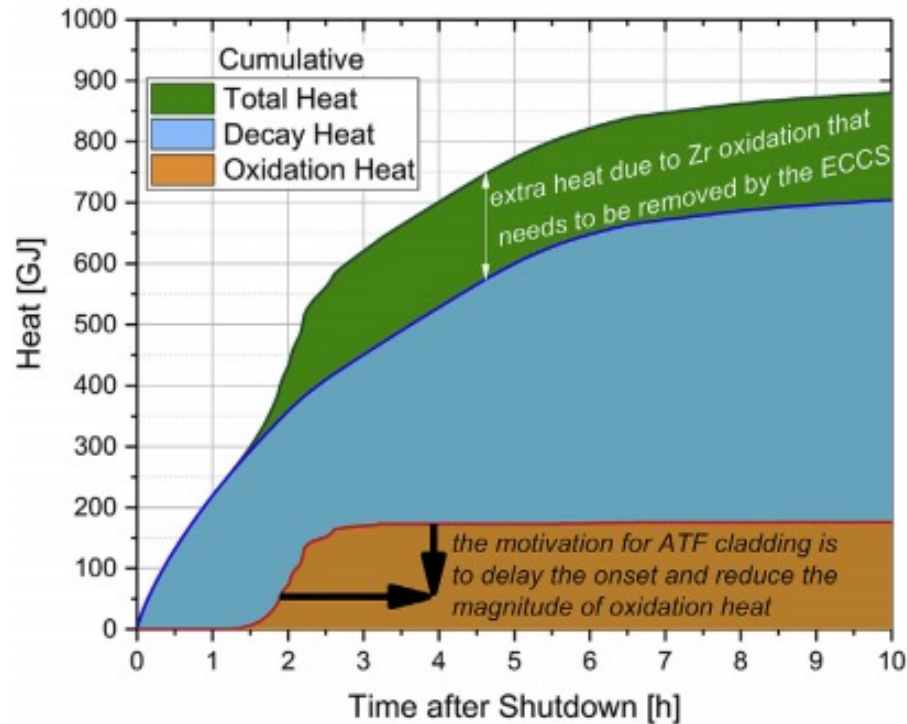
SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL E O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES (ATF)

MÓDULO 4

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL E O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES (ATF)

PARTE 2

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES



REF: K.A. Terrani, "Accident Tolerant Fuel Cladding Development: Promise, Status, and Challenges", Journal of Nuclear Materials, 501, 13-30 (2018).

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

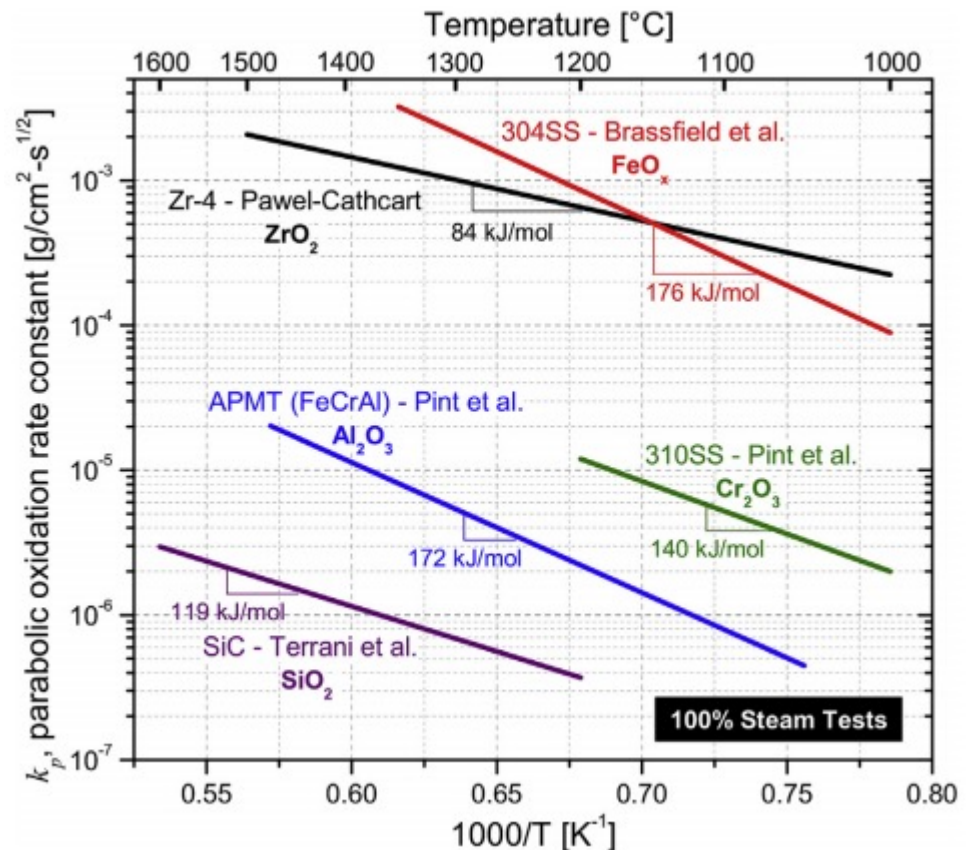
A principal motivação para a substituição de material de revestimento à base de ligas de Zr para um combustível tolerante a acidente (ATF) é: reduzir a sobrecarga sobre o sistema de refrigeração de emergência durante a ocorrência de acidentes severos por meio da diminuição da taxa e da quantidade de calor gerado devido à oxidação do revestimento por vapor de água a altas temperaturas.

Os principais materiais em estudo são:

- Revestimento à base de Zr revestido de Cr
- Revestimento de FeCrAl
- Revestimento de SiC/SiC

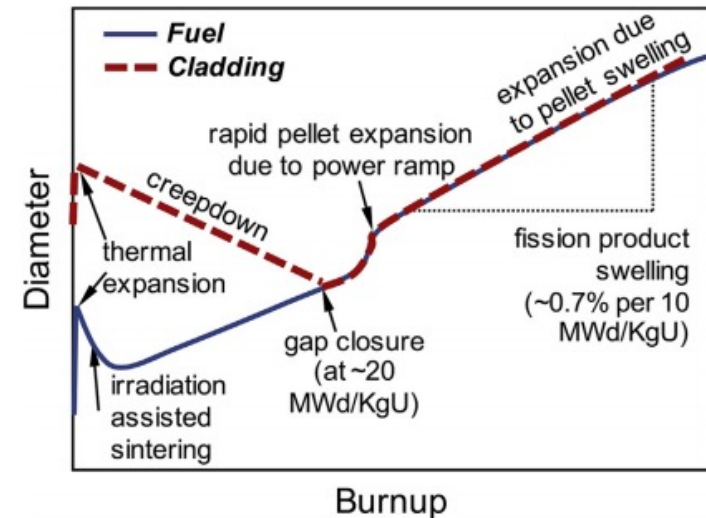
A taxa de oxidação parabólica para esses materiais, os quais, por sua vez, são protegidos pelos filmes de óxido (de cromo, alumínio ou silício) é cerca de duas ordens de magnitude mais baixa que para o Zr.

Esta redução na taxa de oxidação diretamente se traduz na redução da taxa de geração de calor e de hidrogênio no núcleo durante um acidente severo.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Com o início da irradiação, a pastilha e o revestimento experimentam expansão térmica imediata com a alteração da espessura do *gap* inicial preenchido com He. Uma vez que a pressão de He dentro da vareta é sempre menor do que a pressão do refrigerante, a tensão tangencial de compressão no revestimento resulta em fluência do revestimento sobre a pastilha. A pastilha, contendo ~ 5% de porosidade como fabricada, inicialmente sofre densificação induzida pela radiação. No entanto, depois de se atingir baixas queimas (<5 MWd/kgU), a pastilha incha devido à acomodação dos produtos de fissão. Dependendo do histórico de potência da vareta, o *gap* entre a pastilha e o revestimento desaparece por volta de 20 MWd/kgU. Após este ponto, o estado de tensão no revestimento é dominado por sua interação mecânica com a pastilha. A capacidade do revestimento para apresentar ductilidade após este ponto e acomodar a expansão da pastilha é a chave para a manutenção de sua integridade. A expansão rápida da pastilha ocorre em diferentes taxas durante rampas de potência operacionais ou RIA. Enquanto o dano por radiação reduz a ductilidade das ligas à base de Zr como ocorre com a maioria dos metais, a perda mais significativa de ductilidade e capacidade de acomodar tensões no revestimento de varetas de combustível à base de ligas de Zr ocorre devido à captação de hidrogênio como resultado de sua corrosão na superfície em contato com o refrigerante.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Durante a **Operação Normal (NO)**, alta condutividade térmica na pastilha e no revestimento são importantes para limitar a temperatura central do combustível. A fluência adequada, mas não excessiva, em ambos os componentes, e elevada resistência mecânica do revestimento evitam o acúmulo de tensão no revestimento. Fluxo de calor crítico alto para a transferência de calor do revestimento para o refrigerante é desejável. A minimização da corrosão do revestimento para evitar a perda de espessura no tubo de revestimento também é desejável. No caso das ligas à base de Zr como a corrosão da liga é acompanhada pela captação de H, a redução da taxa de corrosão torna-se ainda mais importante.

Desirable properties of LWR fuel cladding and pellet under normal operation (NO), power ramps (PR), loss-of-coolant accident (LOCA), reactivity insertion accident (RIA), and station blackout (SBO). Upward and downward arrows indicate that higher and lower magnitudes are desirable for a given property, while a dash indicates insensitivity.

	Cladding					Fuel Pellet				
	NO	PR	LOCA	RIA	SBO	NO	PR	LOCA	RIA	SBO
Thermal conductivity	↑	↑	↑	-	-	↑	↑	↑	-	-
Heat capacity	-	-	↑	-	↑	-	-	↑	↓	↑
Oxidation rate	↓	↓	↓	↓	↓	-	-	↓	-	↓
Coefficient of thermal expansion	-	-	-	-	-	-	↓	-	↓	-
Creep rate	↑	↑	↓	-	↓	↑	↑	-	-	-
Strength	↑	↑	↑	↑	↑	-	↓	-	↓	-
Critical heat flux (CHF)	↑	↑	-	↑	-	N/A				

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Sob regime de **Rampas de Potência (PR)**, alta condutividade térmica e taxas de fluência junto com um baixo coeficiente de expansão térmica são desejáveis para a pastilha visando a minimizar a interação mecânica entre a pastilha e o revestimento (PCMI). No revestimento, alta resistência aliada à capacidade de acomodar a expansão da pastilha devido à fluência é altamente desejável.

Desirable properties of LWR fuel cladding and pellet under normal operation (NO), power ramps (PR), loss-of-coolant accident (LOCA), reactivity insertion accident (RIA), and station blackout (SBO). Upward and downward arrows indicate that higher and lower magnitudes are desirable for a given property, while a dash indicates insensitivity.

	Cladding					Fuel Pellet				
	NO	PR	LOCA	RIA	SBO	NO	PR	LOCA	RIA	SBO
Thermal conductivity	↑	↑	↑	-	-	↑	↑	↑	-	-
Heat capacity	-	-	↑	-	↑	-	-	↑	↓	↑
Oxidation rate	↓	↓	↓	↓	↓	-	-	↓	-	↓
Coefficient of thermal expansion	-	-	-	-	-	-	↓	-	↓	-
Creep rate	↑	↑	↓	-	↓	↑	↑	-	-	-
Strength	↑	↑	↑	↑	↑	-	↓	-	↓	-
Critical heat flux (CHF)	↑	↑	-	↑	-	N/A				

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Para **Acidente de Perda de Refrigerante (LOCA)**, alta condutividade térmica é desejável no combustível e no revestimento para reduzir a energia térmica armazenada na vareta. Ao mesmo tempo, alta capacidade calorífica também é desejável, uma vez que isso reduzirá a taxa de aumento da temperatura como resultado do calor de decaimento. Importante nesse cenário é a redução da taxa de oxidação do revestimento para limitar sua degradação durante a progressão do acidente e a perda de ductilidade pós-têmpera. A resistência à fluência do revestimento é altamente desejável para retardar a deformação por *ballooning* e o arrebentamento da vareta de combustível.

Desirable properties of LWR fuel cladding and pellet under normal operation (NO), power ramps (PR), loss-of-coolant accident (LOCA), reactivity insertion accident (RIA), and station blackout (SBO). Upward and downward arrows indicate that higher and lower magnitudes are desirable for a given property, while a dash indicates insensitivity.

	Cladding					Fuel Pellet				
	NO	PR	LOCA	RIA	SBO	NO	PR	LOCA	RIA	SBO
Thermal conductivity	↑	↑	↑	-	-	↑	↑	↑	-	-
Heat capacity	-	-	↑	-	↑	-	-	↑	↓	↑
Oxidation rate	↓	↓	↓	↓	↓	-	-	↓	-	↓
Coefficient of thermal expansion	-	-	-	-	-	-	↓	-	↓	-
Creep rate	↑	↑	↓	-	↓	↑	↑	-	-	-
Strength	↑	↑	↑	↑	↑	-	↓	-	↓	-
Critical heat flux (CHF)	↑	↑	-	↑	-	N/A				

Em um cenário de **Acidente de Inserção de Reatividade (RIA)**, em contraste direto com um cenário LOCA, baixa capacidade calorífica no combustível é desejável para limitar a extensão da deposição de energia no núcleo. Uma vez que o coeficiente de expansão térmica da pastilha de combustível diretamente dita a extensão do PCMI, um valor menor para essa propriedade do material é desejável. Um revestimento com características de alta transferência de calor e ductilidade é ideal em um cenário de RIA.

Para um cenário de Acidente além da Base de Projeto (DBA), como um **Station Blackout (SBO)**, quando é possível atingira temperaturas centrais muito superiores a 1200°C, resistência à oxidação por vapor a altas temperaturas, bem como estabilidade química e física são mais importantes.

Desirable properties of LWR fuel cladding and pellet under normal operation (NO), power ramps (PR), loss-of-coolant accident (LOCA), reactivity insertion accident (RIA), and station blackout (SBO). Upward and downward arrows indicate that higher and lower magnitudes are desirable for a given property, while a dash indicates insensitivity.

	Cladding					Fuel Pellet				
	NO	PR	LOCA	RIA	SBO	NO	PR	LOCA	RIA	SBO
Thermal conductivity	↑	↑	↑	-	-	↑	↑	↑	-	-
Heat capacity	-	-	↑	-	↑	-	-	↑	↓	↑
Oxidation rate	↓	↓	↓	↓	↓	-	-	↓	-	↓
Coefficient of thermal expansion	-	-	-	-	-	-	↓	-	↓	-
Creep rate	↑	↑	↓	-	↓	↑	↑	-	-	-
Strength	↑	↑	↑	↑	↑	-	↓	-	↓	-
Critical heat flux (CHF)	↑	↑	-	↑	-	N/A				

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

Camadas finas de revestimento sobre as ligas à base de Zr:

- apresentam um impacto mínimo nas propriedades termomecânicas do material
- não alteram significativamente a física do núcleo
- podem melhorar as propriedades de transferência de calor do revestimento

Principais Requisitos:

- ser aderente e quimicamente estável com o material da liga durante condições normal e anormal de operação, protegendo-a de oxidação rápida durante acidentes além da base de projeto
- conter no mínimo um dos 3 elementos (Cr, Al ou Si) que apresentam elevada capacidade para resistir à oxidação por vapor a altas temperaturas
- resistência a corrosão nas condições de operação de LWR
- estabilidade à irradiação com neutrons
- resistência a oxidação a vapor em altas temperaturas

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

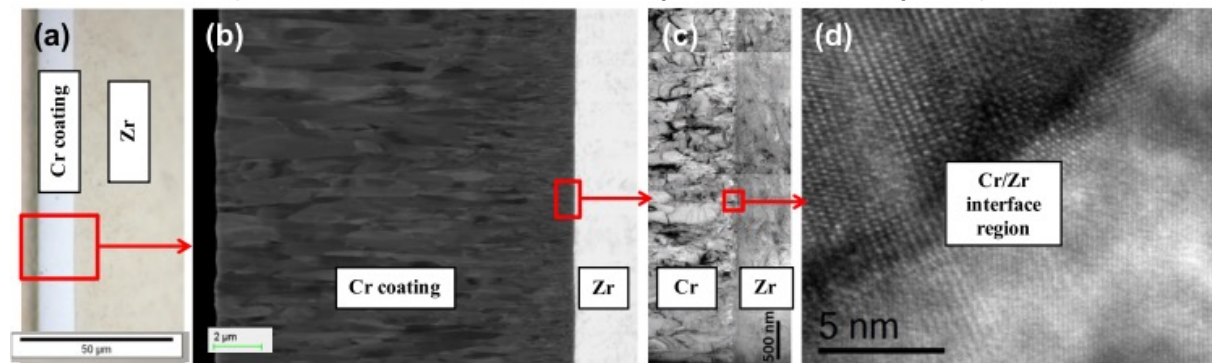
Estágio de Desenvolvimento

As tecnologias de revestimento mais amplamente exploradas em ligas à base de Zr até hoje são aquelas que contêm cromo. Especificamente, têm sido estudados revestimentos de **Cr metálico**, **CrN** e **CrAl**.

No caso do revestimento de **Cr metálico** com uma espessura de até dezenas de micrômetros, o cromo resultante que se forma em ambiente aquoso ou de vapor a altas temperaturas protege o metal Zr da liga do material de revestimento. Além disso, a presença da camada de revestimento reduz o a extensão do *ballooning* durante o teste de LOCA.

Vários experimentos para avaliar melhor o desempenho desta tecnologia estão atualmente em andamento, com dados preliminares de irradiação com íons indicando comportamento adequado.

Como um metal de estrutura cúbica de corpo centrado, espera-se que o Cr metálico exiba estabilidade dimensional durante a irradiação com nêutrons em temperaturas de operação de LWR.



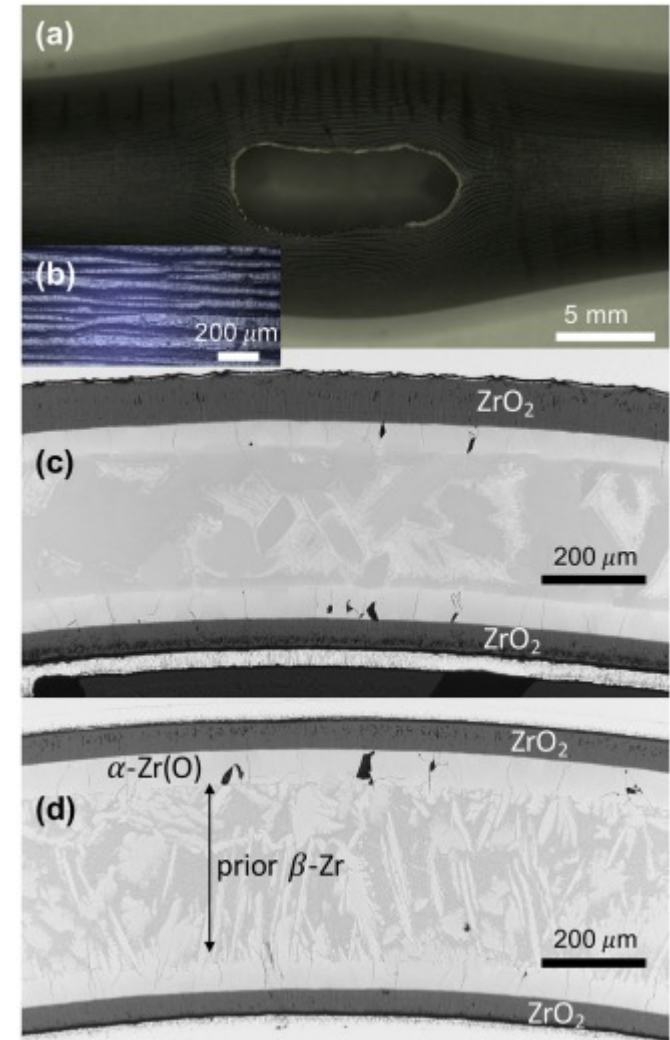
DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

Estágio de Desenvolvimento

Revestimento com fina camada ($<5 \mu\text{m}$) de **CrN** demonstram excelente estabilidade em condições típicas de irradiação.

Testes de LOCA de revestimento recoberto com **CrN** não irradiado apresentaram excelente aderência do revestimento, mesmo após o teste de arrebetamento, porém não mostrou melhora na oxidação ou desempenho no ensaio de arrebetamento em comparação ao material não revestido.

Embora os efeitos adversos do N durante a oxidação do ar de ligas à base de Zr sejam bem compreendidos, a pequena quantidade deste elemento na fina camada de revestimento não deve causar grande degradação do revestimento durante oxidação por vapor a altas temperaturas.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

Estágio de Desenvolvimento

Os revestimentos destinados a formar alumina ou sílica manifestaram-se predominantemente como FeCrAl, Ti_2AlC , TiAlN, Ti_3SiC_2 e Cr_2AlC , embora nenhum destes testes até o momento tenham produzido uma avaliação completa de desempenho do revestimento sob operação normal, acidentes da base de projeto e além da base de projeto.

O revestimento de FeCrAl, embora adequado para condições normal de operação, forma um eutético com Zr em temperaturas $<1200^0$ C e não é considerado um revestimento ATF útil.

Outros materiais de revestimento que não contêm Cr, Al ou Si e, portanto, não podem produzir uma película protetora de óxido não são considerados como tecnologias de revestimento ATF.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

Estágio de Desenvolvimento

Resumindo, o revestimento à base de Cr metálico é a tecnologia mais promissora para desenvolvimentos futuros. As mesmas películas de óxido protetoras que protegem os revestimentos contendo Cr-, Al- e Si em altas temperaturas também se formam no ambiente de LWR. Infelizmente, apenas o cromo é estável neste ambiente, enquanto a sílica e a alumina tendem a se dissolver rapidamente como ácido silícico, H_4SiO_4 e oxi-hidróxido de alumínio, $AlO(OH)$. A incorporação de Ti, que forma um óxido estável (muito parecido com Zr), nestes revestimentos pode mitigar a dissolução (por exemplo, TiN/TiAlN); contudo (novamente similar ao Zr), o Ti sofre oxidação rápida em altas temperaturas e sua prevalência no revestimento provavelmente comprometerá a natureza protetora da alumina/sílica (por exemplo, a sílica protetora não se forma durante a oxidação a altas temperaturas de Ti_3SiC_2).

	Cr	CrN	CrAlN	TiAlN	TiN/TiAlN	Ti ₂ AlC	Ti ₃ SiC ₂	CrAlC
Resistant to corrosion in LWR coolant	Y	Y	N	N	Y	U	U	N
Stable under neutron irradiation (260–400 °C)	Y	Y	U	U	U	N	N	U
Increased resistant to high temperature steam oxidation	Y	N	U	Y	U	Y	N	U

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

Desafios e estudos necessários

O zircônio permanece no núcleo

Ao mesmo tempo que a utilização de revestimento de ligas à base de zircônio revestidas é a tecnologia ATF mais promissora a curto prazo, ela apresenta o maior desafio para a melhoria de desempenho: o fato das cerca de 35 a 40 toneladas de zircônio metálico permanecem no núcleo do reator.

Considerando-se um acidente com refrigeração limitada, como um acidente de perda de refrigerante (LOCA), o *ballooning* e o *burst* do revestimento ocorrem em temperaturas tão baixas quanto 700°C. Isso expõe pelo menos alguma fração da superfície interna do revestimento ao ambiente oxidante, mesmo que a superfície externa esteja protegida pela camada de revestimento. Pesquisas recentes visam a resolver esse problema adicionando uma camada de revestimento também na superfície interna.

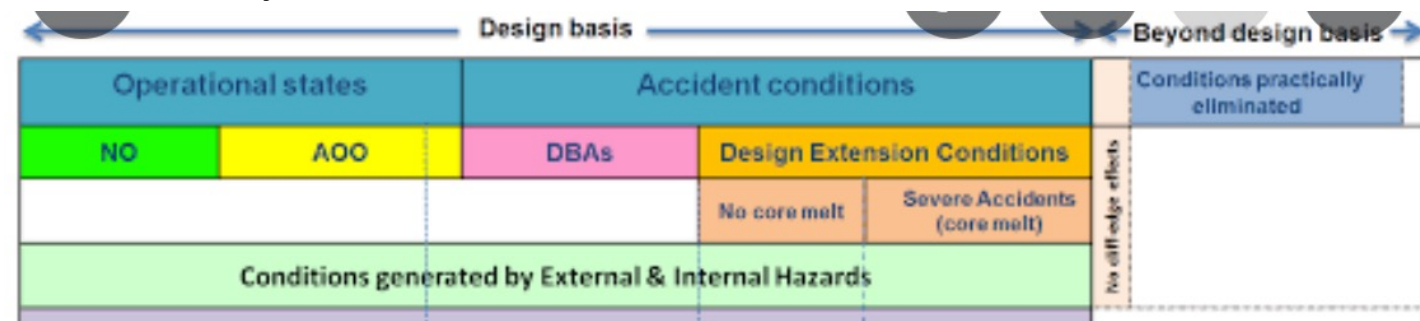


DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

Desafios e estudos necessários

Necessidade de dados experimentais para condição de acidentes além da base de projeto

A maioria dos estudos existentes não apresenta resultados que excedam o limite de temperatura de um acidente de LOCA de base de projeto (1204°C) durante os ensaios de oxidação com vapor a altas temperaturas. Esses ambientes de fato demandam muito do revestimento, que precisa resistir à oxidação por vapor de um lado e à reação química com o metal Zr altamente reativo do outro. Assim, várias tecnologias de revestimento emergentes são promissoras para melhorar o desempenho do combustível durante a operação normal (Cr, CrN e TiN) e devem ser buscadas para elevar seu nível de prontidão de tecnologia para implantação final em reatores comerciais. É importante lembrar que a tecnologia de revestimento baseada em ligas à base de Zr é considerada segura e adequada para cenários normais de ocorrência operacional antecipada (AOO) e acidentes da base de projeto (DBA). No entanto, para condições além da base de projeto DBA, há a necessidade da realização de testes com tecnologias de revestimento ATF para mostrar seus efeitos no desempenho do revestimento; tais testes estão claramente ausentes em praticamente todas as tecnologias ATF baseadas em revestimento em ligas à base de zircônio em desenvolvimento até hoje.



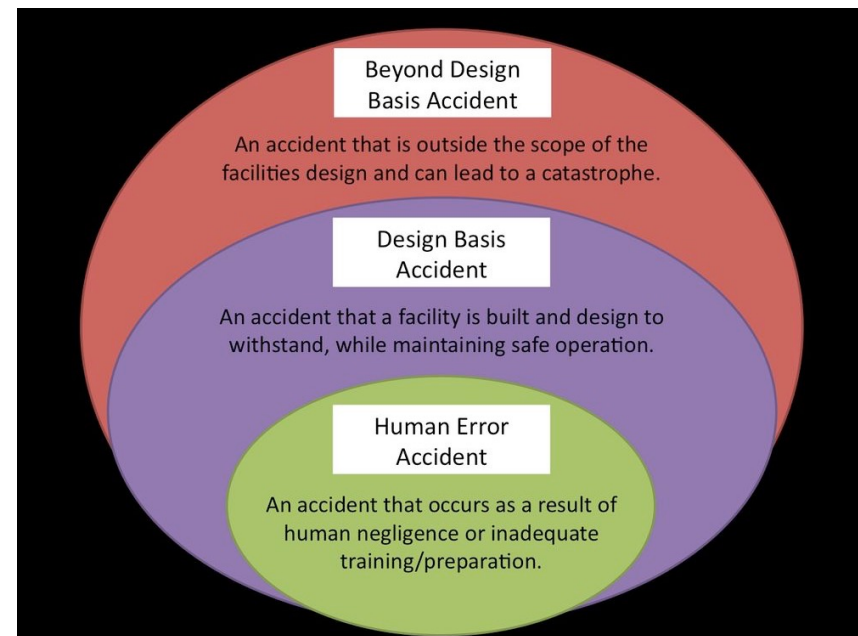
DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO À BASE DE Zr REVESTIDO

Desafios e estudos necessários

Necessidade de dados experimentais para condição de acidentes além da base de projeto

Há alguns dados que mostram como o revestimento à base de Zr revestido com Cr melhora o limite de temperatura de revestimento de pico do acidente de LOCA de base do projeto (em $\sim 100^{\circ}\text{C}$) e aumenta o tempo em temperaturas elevadas antes que a ductilidade pós-têmpera seja perdida (horas para revestimento revestido em vez de minutos para revestimento não revestido).

O impacto dessas margens de segurança adicionais no comportamento do revestimento quando submetido a condições além da base de projeto em LWR deve ser avaliado por meio do uso de códigos de análise de acidentes severos, os quais requerem, para sua validação, dados experimentais.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

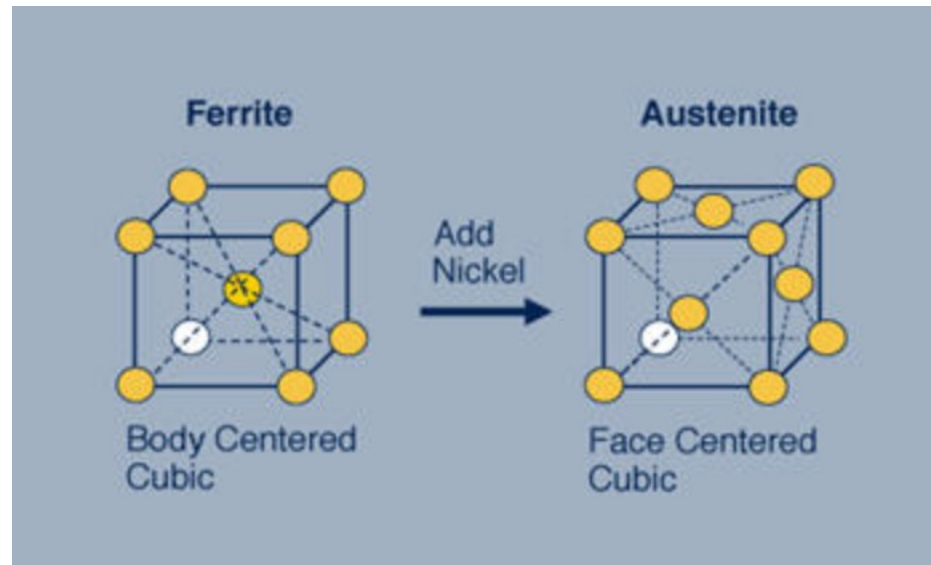
Ligas à base de Fe têm sido usadas como revestimento de combustível nuclear desde 1951, quando o Reator Experimental I (EBR-I) foi criticalizado pela primeira vez utilizando elementos de combustível fabricados em aço inoxidável austenítico. Naturalmente, o uso dessas ligas austeníticas foi estendido para LWR comerciais por décadas, embora a primeira planta LWR em Shippingport, Pensilvânia, tenha iniciado sua operação com combustível revestido à base de Zr fornecido pela marinha americana.

Aços inoxidáveis austeníticos (tipos 304, 316 e 347) usados como revestimento em BWR foram sendo substituídos por revestimento à base de Zr devido à falha de corrosão sob tensão (SCC) experimentada em condições de refrigeração com alta atividade de oxigênio antes de 1990, sem o controle da química da água. Este modo de falha é diferente de um modo anteriormente comum de falha SCC em ligas à base de Zr: produtos de fissão corrosivos iniciaram falha na superfície interna do revestimento. Embora as varetas de combustível com revestimento em aço austenítico operassem de forma confiável em PWR, o impulso para atingir queimas mais altas e, por extensão, melhor economia, foram os fatores motivadores para sua substituição por revestimento à base de ligas de Zr.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

Aços ferríticos, tendo uma estrutura BCC (cúbica de corpo centrado) em oposição à estrutura FCC (cúbica de face centrada) dos aços austeníticos à base de ferro, são conhecidos por exibirem melhor resistência a SCC, mas nunca foram adotados para uso em LWR comerciais, embora tenham sido usados em reatores rápidos refrigerados a sódio.

Ligas ferríticas também foram desenvolvidas para outras aplicações potenciais de energia nuclear comercial, como o programa de desenvolvimento da General Electric na década de 1960, que visava a tirar proveito da resistência à oxidação em alta temperatura de ligas ferríticas FeCr, FeAl e FeCrAl, para aplicações em reatores a altas temperaturas.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

Após Fukushima, o reexame de ligas à base de Fe resistentes à oxidação para aplicação em LWR foi reavaliado. Mais uma vez, focou-se em ligas capazes de formar camadas protetoras de cromo, alumina ou sílica. Para formar filmes de óxido de cromo protetores, aços ferríticos com teor de Cr > 22% em peso foram considerados necessários, ultrapassando de longe o teor de Cr acima do qual uma separação de fase e fragilização resultante ocorre no sistema binário Fe-Cr em temperaturas relevantes de LWR.

Para ligas austeníticas capazes de formar uma camada de óxido de cromo protetora em 1200°C (por exemplo, AISI 310), teores de Cr semelhantes tiveram que ser acompanhados por altas adições de Ni para preservar a estrutura FCC. Isso, por sua vez, resulta em alta absorção de nêutrons térmicos no revestimento (~10 vezes maior do que o revestimento baseado em Zr) e é considerado impraticável. Adições de 2% em peso de Si ao Fe-12Cr melhoraram significativamente a resistência à oxidação por vapor de água, mas a formação da camada protetora em ambiente de vapor de água limita-se a temperaturas inferiores a 1100°C. Embora as ligas austeníticas que formam camadas protetoras de alumina não sejam resistentes à oxidação sob essas mesmas condições, uma resistência excepcional à oxidação por vapor foi observada para ligas FeCrAl ferríticas até perto de seu ponto de fusão (~ 1500°C).

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES **MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl**

Estágio de Desenvolvimento

Programas dedicados de P&D nos Estados Unidos e no Japão estão buscando o desenvolvimento de revestimento FeCrAl como uma tecnologia de revestimento ATF. O foco principal dos programas é o desenvolvimento de variantes de ligas resistentes à oxidação.

Para tal, as atividades no Japão buscam melhorar muito a resistência do material com o desenvolvimento de ligas de FeCrAl reforçadas com dispersão de óxido (ODS). Para evitar a fragilização do revestimento FeCrAl como resultado da precipitação α' que ocorre após a irradiação na faixa de 300 a 400 °C (temperaturas de operação de LWR), ligas de FeCrAl comerciais (13% em peso de Cr, 4% em peso de Al) foram avaliadas para esta aplicação. No entanto, essas composições, embora resistentes à oxidação ao ar, foram descobertas como tendo pouca resistência ao vapor a altas temperaturas. Consequentemente, estudos sistemáticos dos teores críticos de Al e Cr na composição da liga foram realizados para identificar a combinação necessária para fornecer resistência adequada à oxidação por vapor até ~ 1500°C. Além disso, os efeitos da composição da liga em seu ponto de fusão, oxidação além do ponto de fusão e compatibilidade com outros constituintes do elemento de combustível foram examinados.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

Estágio de Desenvolvimento

A resistência e a ductilidade de ligas FeCrAl podem ser ajustadas controlando a composição da liga e a microestrutura para atingir valores comparáveis ou superiores aos das ligas à base de Zr. Propriedades mecânicas após irradiação com nêutrons, para doses compatíveis para revestimento de combustível LWR foram quantificadas.

Uma variedade de estudos recentes de soldagem e dados limitados de irradiação de nêutrons nessas soldas estão agora disponíveis, indicando que soldas robustas baseadas em fusão são possíveis por meio do controle estrito do processo e da composição da liga. O comportamento de corrosão dessas ligas em ambientes de refrigeração LWR foi examinado, e a resistência à corrosão uniforme por meio da formação de óxidos ricos em Cr (totalmente distintos da formação de alumina em vapor a altas temperaturas) sem uma dependência notável na composição da liga. Devido à sua estrutura BCC, ligas ferríticas exibem maior resistência a SCC em ambientes aquosos quando comparadas aos aços inoxidáveis austeníticos. Isso, combinado com o rigoroso controle químico da água dos atuais LWR, atenua a preocupação histórica com falha de varetas de combustível com revestimento à base de ligas de Fe.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES **MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl**

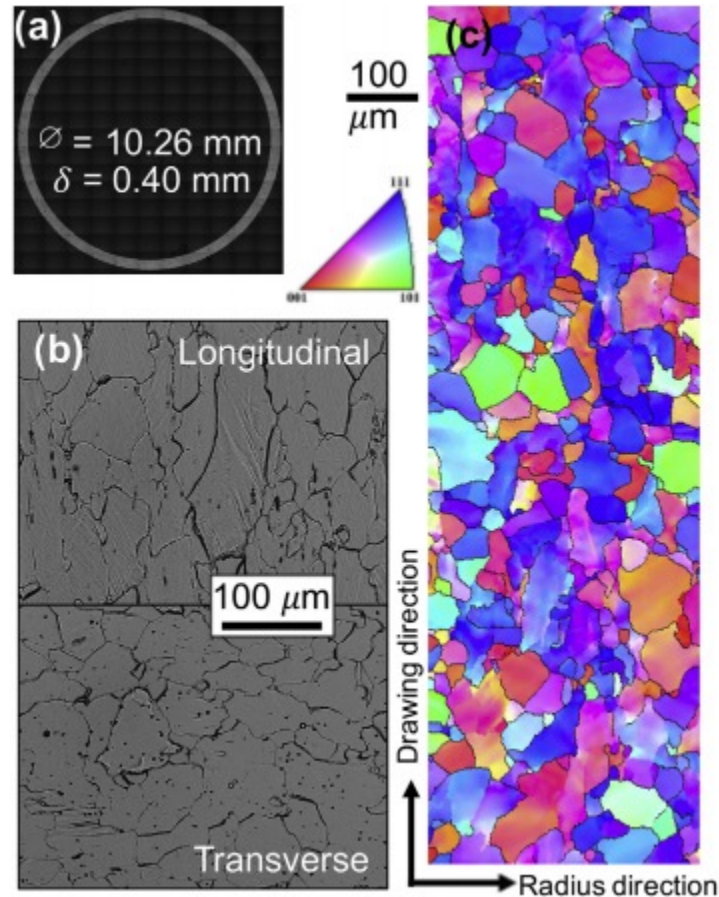
Estágio de Desenvolvimento

O desempenho do combustível e o comportamento de pastilhas de UO_2 revestidas com FeCrAl, em sua geometria de parede fina ideal, foram avaliados, indicando um desempenho confiável. Espera-se que a operação normal e o comportamento AOO do revestimento FeCrAl sejam superiores aos de revestimentos baseados em Zr, dada a resistência à oxidação aumentada durante eventos pós-CHF e indicações de CHF mais alto.

Os testes de simulação de LOCA indicam comportamento de ruptura comparável aos dos revestimentos baseados em Zr, enquanto nenhuma perda de ductilidade pós-têmpera foi observada. A adoção de variantes ODS do FeCrAl com maior força e resistência à fluência em alta temperatura, devido à dispersão de partículas finas de óxido, deve aumentar muito as margens de ruptura, preservando a resistência à oxidação até próximo à fusão do material.

Muito parecido com o revestimento baseado em Zr não irradiado, o revestimento FeCrAl exibe ductilidade abundante durante testes rápidos de PCMI, simulando eventos de RIA. Uma vez que a perda de ductilidade após a irradiação com nêutrons não é exacerbada pela formação de precipitado de hidreto nessas ligas, um melhor desempenho de PCMI também é esperado em altas queimas.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

Desafios

Pobre fator de utilização de nêutrons térmicos

A composição da liga FeCrAl de grau nuclear foi otimizada (10 a 13% em peso de Cr, 5,5 a 6% em peso de Al, 2% em peso de Mo e <0,1% em peso de Y) para aliviar as questões de fragilização enquanto exibe robusta estabilidade nas condições de irradiação. No entanto, outros desafios permanecem com este sistema de revestimento que são inerentes ao material. O primeiro é a magnitude da seção transversal de absorção de nêutrons do Fe e do Cr, resultando em cerca de 4 a 6% dos nêutrons térmicos sendo absorvidos no revestimento vs. ~ 1% absorvido nos revestimentos com ligas à base de Zr. Para compensar essa absorção, o grau de enriquecimento da pastilha pode ser aumentado e/ou a espessura do revestimento reduzida e o diâmetro da pastilha aumentado, permitindo ciclos mais longos, comparáveis aos do sistema combustível convencional. Em ambos os casos, isso é acompanhado por um custo extra (ou seja, custo de enriquecimento ou custo de maior massa de combustível), resultando em um aumento de cerca de 15 a 25% no custo do elemento de combustível.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

Desafios

Potencial para maior liberação de trítio

Outro grande desafio para a utilização de FeCrAl é a permeabilidade das ligas ferríticas BCC aos isótopos do H, especificamente trítio que se forma como resultado da fissão ternária no combustível. Em PWR, um inventário substancial de trítio é produzido a partir do ácido bórico dissolvido no refrigerante e está contido no circuito primário. Em BWR, na ausência de B dissolvido no refrigerante, a principal fonte de produção de trítio é o combustível e, uma vez que o sistema do reator injeta vapor diretamente do núcleo para as turbinas, a liberação aumentada de trítio do combustível é impactante. No sistema combustível convencional, a forte afinidade química do Zr pelo H aprisiona o trítio à medida que ele se difunde do combustível em direção ao refrigerante. No caso das ligas ferríticas, a permeabilidade é aproximadamente duas ordens de magnitude maior do que a das ligas à base de Zr e duas vezes maior que a das ligas de Fe austenítico. O impacto total do aumento da liberação precisa ser estudado, como ocorreu anteriormente em núcleos PWR e BWR com varetas de combustível com revestimento de aço inoxidável austenítico.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

Desafios

Potencial para maior liberação de trítio

A permeabilidade a H pode ser retardada pela inserção de filmes de óxido na superfície do revestimento, que podem ser parte do projeto da vareta ou crescidos in-situ durante a operação. Uma vez que a alumina se dissolve em água a altas temperaturas, os candidatos potenciais são os óxidos ricos em (Fe, Cr) externos que se formam durante a corrosão uniforme ou uma alumina interna que pode se formar, como resultado da interação química entre o revestimento e o combustível. Evidências de que a primeira é uma barreira eficaz foram recentemente disponibilizadas. Relevante para a formação de uma barreira de alumina na superfície interna do revestimento, um estudo recente da oxidação de FeCrAl ao ar relatou a formação de óxidos de apenas 10 e 50 nm após exposições de 100 h a 300 e 600°C, com alumina cristalina formando-se apenas em temperaturas mais altas.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE FeCrAl

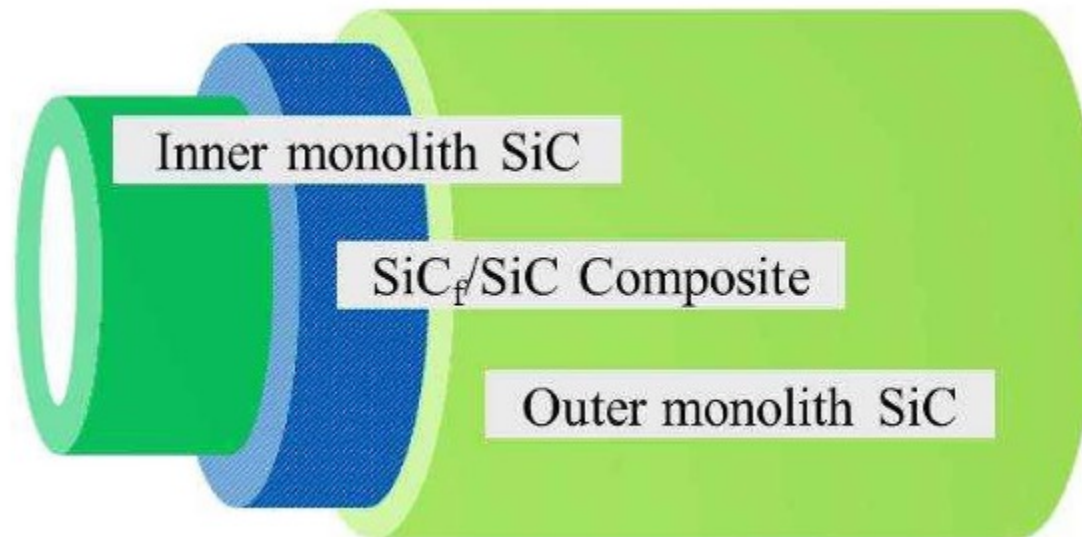
Desafios

Necessidade de elucidação do comportamento além da base de projeto

Embora o sistema $\text{UO}_2\text{-FeCrAl}$ apresente o maior número estudos de acidentes severos de qualquer outro candidato a ATF até o momento, para ser possível quantificar os ganhos nas margens de segurança e no tempo de mitigação durante tais eventos, ainda é necessário se obter mais dados. Apesar da formação de alumina, inerente ao material, oferecer notável resistência à oxidação até $\sim 1500^\circ\text{C}$, observa-se a oxidação rápida do material em temperaturas próximas ao ponto de fusão da liga. Assim, o comportamento da vareta de combustível com revestimento de FeCrAl, bem como do elemento de combustível além deste ponto ainda não está bem compreendido. Testes de oxidação do elemento de combustível completo, até e além deste ponto, são necessários para obter informações adicionais. Os resultados das simulações de acidentes severos mostram que, embora significativamente menos H_2 e CO sejam produzidos, o tempo de enfrentamento adicional para cenários SBO de curto e longo prazos é da ordem de 1 a 5 h, aumentando considerando-se cenários de acidentes com início após o desligamento do núcleo. A utilidade desse tempo de enfrentamento adicional, embora seja considerada superior aos dos ATF que utilizam uma camada de revestimento, precisa ser melhor avaliada.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

A tecnologia do composto de matriz de SiC reforçado com fibra de SiC (SiC/SiC) produziu materiais de engenharia usados hoje em aplicações altamente demandantes, como componentes de motores a jato comerciais. No entanto, a tecnologia se originou de P&D relacionada à energia nuclear na década de 1970, quando se produziu pela primeira vez fibras de SiC de alta resistência. A aplicação de SiC em grande escala em sistemas de energia baseados em fissão persiste até os dias de hoje, com seu uso como um constituinte de partículas de combustível revestidas em reatores refrigerados a gás de altas temperaturas.

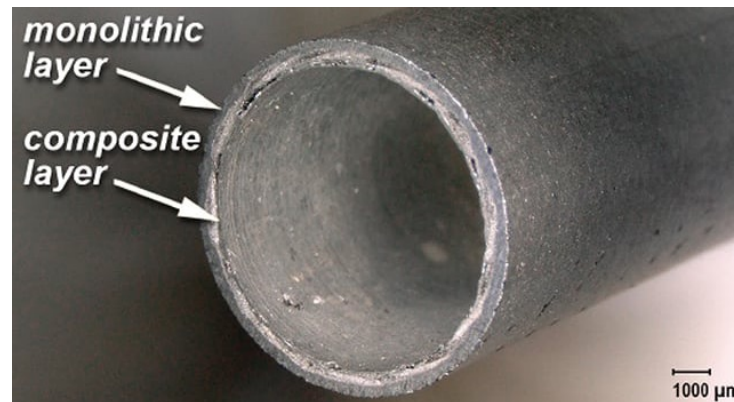


DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Estágio de Desenvolvimento

Hoje, novas gerações de fibra de SiC e métodos de produção de compostos que produzem SiC/SiC de grau nuclear estão disponíveis. O SiC/SiC de grau nuclear é definido aqui como compósitos que utilizam fibras de SiC de Geração III com deposição de vapor químico (CVI) ou matrizes de SiC com transiente de fase eutética nanoinfiltrado (NITE). CVI consiste na deposição de vapor químico de SiC usando metiltriclorosilano (MTS) ou etiltriclorosilano (ETS) sobre a fibra de SiC para formar um compósito denso. O processo NITE forma uma matriz de SiC sinterizada com alta cristalinidade a partir de matéria-prima de nanopó para evitar danos às fibras durante a sua formação. Outros métodos de formação de matriz de SiC, como infiltração de fusão (ou infiltração de silício líquido), reação de sinterização ou impregnação de polímero e pirólise, produzem grandes frações de fases secundárias ou regiões amorfas no material, não são consideradas estáveis à radiação. Devido à sua excepcional resistência à oxidação e resistência a altas temperaturas, ultrapassando de longe os materiais de revestimento à base de Zr revestido com Cr ou FeCrAl, os compósitos de SiC/SiC são considerados o material de revestimento ATF ideal.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Estágio de Desenvolvimento

Duas rotas de produção distintas para revestimento de SiC/SiC estão em uso hoje, em conformidade com os dois métodos estáveis à radiação descritos anteriormente.

A metodologia CVI isotérmica é a metodologia mais comum para a produção de revestimento usada nos Estados Unidos, França, Coreia do Sul e Japão. Este método resulta em um composto altamente puro e cristalino e, portanto, altamente estável à radiação, de densidade relativamente baixa (com porosidade de 10 a 25%).

A segunda rota para a produção de revestimento de SiC/SiC, buscada principalmente no Japão, envolvendo o processo NITE, com a utilização de prensagem a quente para a produção de revestimento também é utilizada em outros lugares, pois esta metodologia fornece um material denso com propriedades mecânicas melhoradas.

Há estudos também avaliando a combinação das técnicas CVI e NITE para a produção de SiC/SiC de grau nuclear.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Estágio de Desenvolvimento

Além de estabelecer uma metodologia de produção robusta, o foco dos esforços de desenvolvimento na última década foi fixado em compreender e quantificar o comportamento mecânico das estruturas de compósitos de SiC/SiC na forma de tubos, desenvolvendo métodos de união estáveis à radiação e testes de irradiação com nêutrons destes materiais.

Estudos de caracterização mecânica utilizando várias técnicas e a organização de “*round robin tests*” forneceram um bom entendimento sobre a resposta mecânica de estruturas de revestimento à base de SiC/SiC.

Uma variedade de juntas foi analisada e irradiada sob temperaturas típicas de LWR, resultando na identificação de juntas baseadas em SiC como as mais adequadas.

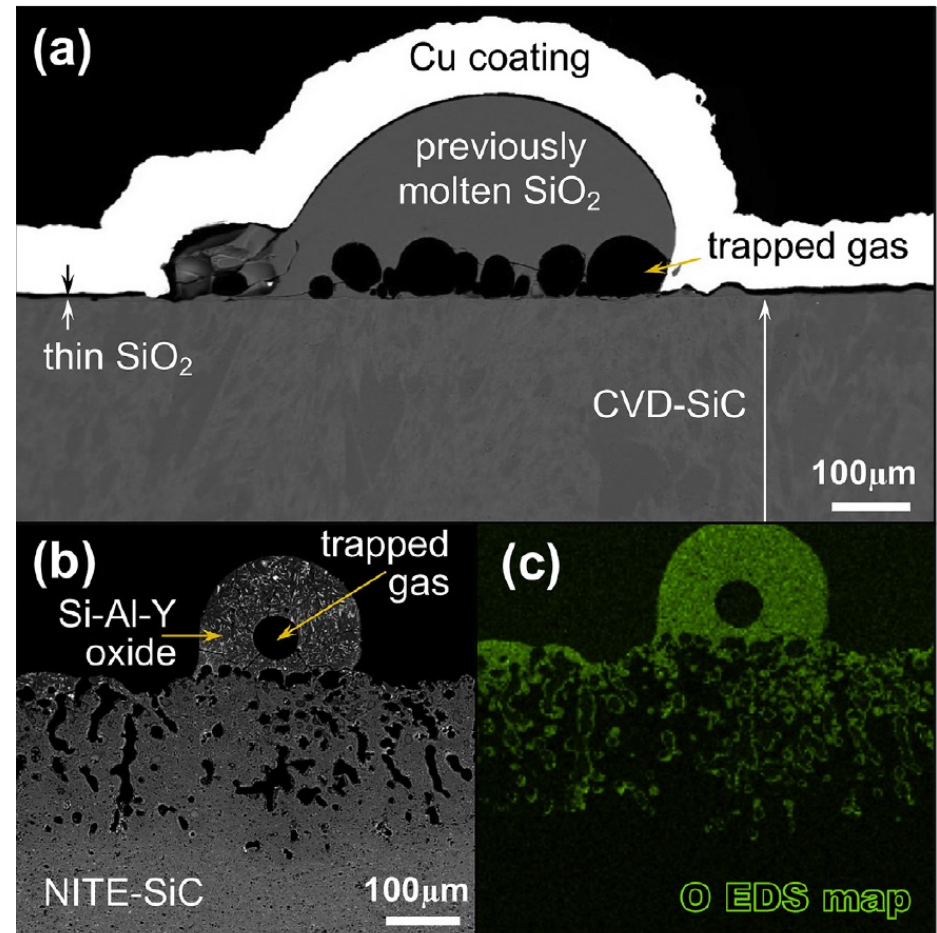
Os testes de irradiação com nêutrons em temperaturas típicas de LWR mostraram que o comportamento mecânico do compósito SiC/SiC não se degrada dentro dos regimes de doses aplicáveis a materiais de revestimento em LWR. Testes de compatibilidade química entre combustível e revestimento não indicam interação apreciável (pelo menos na ausência de radiação) entre SiC e UO_2 abaixo de 1200°C .



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Estágio de Desenvolvimento

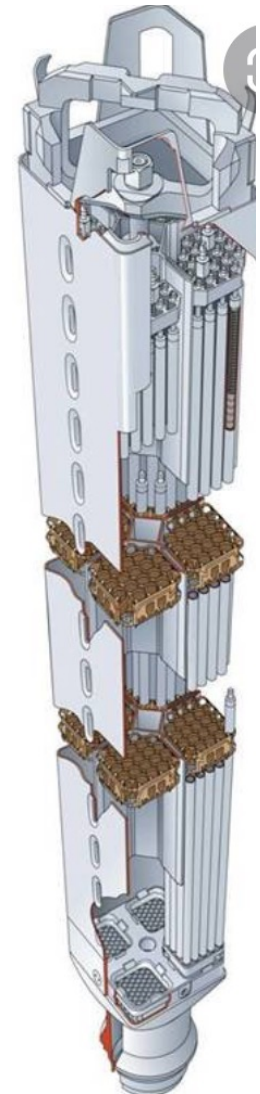
Também nos últimos anos, uma série de testes de oxidação a vapor em altas temperaturas e de *quench* foram conduzidos em materiais à base de SiC para avaliar seu desempenho em condições além da base de projeto. Um exemplo é apresentado na figura ao lado, mostrando amostras obtidas a partir da deposição de vapor químico (CVD-SiC) e NITE-SiC após testes de oxidação a vapor a 1700°C. Mesmo que o filme de sílica na superfície funda nessa temperatura, a oxidação progride muito mais lentamente do que em materiais de revestimento metálicos. Todos esses testes indicam claramente que, devido ao seu desempenho superior sob essas condições extremas, se implantado com sucesso, o revestimento baseado em SiC é a tecnologia ATF de maior impacto em cenários além das bases de projeto.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Estágio de Desenvolvimento

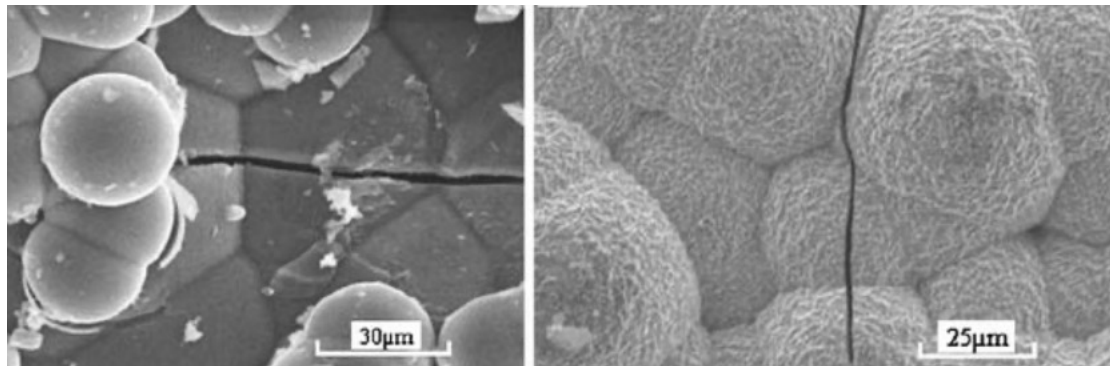
É importante notar que ao mesmo tempo que o SiC/SiC é estudado para ser utilizado como revestimento de combustível LWR, também foi considerado como um substituto potencial para a estrutura de Zr em elementos de combustível de BWR. Uma vez que a absorção de nêutrons térmicos é ainda menor em SiC do que em Zr, tal substituição é acompanhada por uma vantagem imediata para uma melhor utilização de combustível em LWR. Assim, considera-se a aplicação em BWR mais imediata para SiC/SiC em LWR antes de sua implantação como material de revestimento.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Desafios

Há dois problemas críticos para viabilizar o uso dessa tecnologia: corrosão aquosa e falha no revestimento do combustível devido a microtrincas durante as condições normais de operação. Assim, esses pontos vêm sendo estudados.



CVD SiC

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Desafios

Dissolução de SiC em ambientes aquosos

A corrosão de materiais à base de SiC em água a altas temperatura e pressão, foi estudada já na década de 1980, quando a perda de massa em função do tempo foi relatada. Estudos específicos para a química do refrigerante LWR surgiram desde os anos 2000, indicando o comportamento superior do SiC de alta pureza. De forma similar ao que ocorre em ambientes de vapor a altas temperaturas, o processo de corrosão é iniciado com a oxidação de Si em SiC para formar sílica enquanto o C, predominantemente, volatiliza como CO_2 , CO ou CH_4 , dependendo da concentração de oxigênio no sistema. No entanto, ao contrário dos ambientes de fluxo de vapor onde SiO_2 sofre lenta volatilização como $\text{Si(OH)}_4(\text{g})$, a sílica recém-formada se dissolve rapidamente no ambiente aquoso como ácido silícico. Uma vez que a solubilidade da sílica em água a altas temperaturas é elevada, sua taxa de dissolução é muito mais rápida do que sua taxa de formação, ocorrendo a corrosão hidrotérmica do SiC.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Desafios

Dissolução de SiC em ambientes aquosos

Apenas recentemente testes de corrosão de SiC em um ambiente químico de água foi realizado, produzindo dados de alta qualidade. No entanto, para mitigar inteiramente a dissolução do SiC, o uso de revestimentos sobre o SiC resistentes à corrosão aquosos foi proposto. Da mesma forma que no revestimento de ligas à base de Zr, o Cr, o CrN e o TiN são os revestimentos estudados. Os resultados preliminares de SiC revestido, são promissores, indicando que esses revestimentos são capazes de acomodar a deformação por inchamento na matriz de SiC e permanecem aderentes e isentos de trincas.

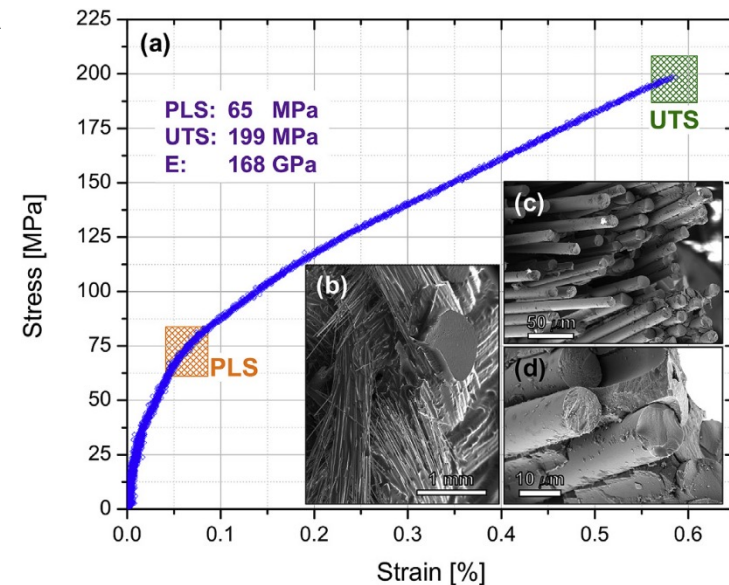
DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Desafios

Potencial de liberação de radionuclídeos devido a microtrincas

O potencial de falha do revestimento do combustível SiC/SiC devido a microtrincas é outra área que vem sendo estudada. A falha neste caso não é definida por uma quebra catastrófica no material; ao vez disso, é caracterizado pela formação de um caminho, provavelmente uma rede de microfissuras, que permite a liberação de radionuclídeos das partes internas do revestimento para o refrigerante. Os compósitos de SiC/SiC foram projetados para exibir ductilidade macroscópica e, portanto, são materiais estruturais robustos. No entanto, o mecanismo que facilita essa ductilidade macroscópica consiste na geração de microtrincas na matriz de SiC (uma vez que o módulo da matriz é maior do que o da fibra, ele racha primeiro) seguido pela expulsão da fibra. Portanto, é esperado que as microtrincas produzidas na matriz forneçam um caminho para a liberação de radionuclídeos quando o compósito é utilizado como material de revestimento. Enquanto a falha catastrófica em compósitos de SiC/SiC ocorre em uma tensão de tração final (UTS) de ~200 a ~400 MPa e uma deformação total de ~ 0,5%, o aparecimento de microtrincas na matriz se desenvolve já com ~90 MPa (CVI) e ~200 MPa (NITE) de tensão ou ~0,05% deformação.



DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Desafios

Potencial de liberação de radionuclídeos devido a microtrincas

A capacidade do revestimento de SiC/SiC de permanecer hermético sob irradiação e alto fluxo de calor é tema de pesquisas em andamento. Os primeiros resultados experimentais parecem confirmar as previsões do modelo de alta tensão de tração na superfície interna do revestimento. É concebível que as microtrincas iniciadas na superfície interna possam parar à medida que se propagam através da espessura do revestimento em direção à região que sofre forte tensão de compressão; esta hipótese será verificada experimentalmente com um aparelho de detecção de vazamento. Assim, o potencial de geração de microtrincas em revestimento de SiC/SiC reforça ainda mais a utilidade de uma camada de revestimento externa que possa servir ao duplo propósito de proteger o SiC da corrosão hidrotérmica, enquanto serve como uma barreira adicional para a liberação de radionuclídeos.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Desafios

Necessidade de definição do material padrão

SiC/SiC é um material muito diferente dos demais revestimentos metálicos usados em plantas nucleares: seus constituintes são materiais cerâmicos quebradiços e ele é heterogêneo. Assim, sua utilização como um material qualificado requer requisitos de projeto bem definidos. Embora tais requisitos e normas existam prontamente para materiais metálicos, eles estão atualmente sendo definidos e desenvolvidos para compósitos de matriz cerâmica. Essa atividade é de suma importância e precisa ser apoiada de forma ampla e completa pela comunidade nuclear. A natureza heterogênea de SiC/SiC (ou seja, fibra dentro da matriz) pode se manifestar em uma miríade de arquiteturas, facilitando a oportunidade de produzir um compósito ajustado para uma aplicação específica. Por exemplo, totalmente compósito (tecido ou trançado), compósito tecido com um monolito interno, compósito trançado com um monolito externo e conceitos híbridos de compósito e revestimento metálico podem ser utilizados. Isso implica que falta um entendimento unânime sobre o projeto ideal para o revestimento de SiC/SiC. A definição de projeto de revestimento de combustível SiC/SiC padrão e ideal para ser adotado por toda a comunidade nuclear deve ser considerada de alta prioridade.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES MATERIAL DE REVESTIMENTO DE SiC/SiC

Desafios

Necessidade de elucidação do comportamento além da base de projeto

Altas pressões de vapor, que podem estar presentes durante acidentes severos, podem aumentar a taxa de oxidação do revestimento, causando a formação de poros na camada de sílica protetora. Estudos recentes indicam que a formação de poros pode se manifestar mesmo em pressões atmosféricas quando uma alta pressão parcial de gases do produto de oxidação (ou seja, H_2 , CO , $Si(OH)_4$) estão presentes no sistema. Assim, testes são necessários para avaliar o comportamento da tecnologia de revestimento de SiC/SiC em cenários além das bases de projeto.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Discussão

A tecnologia baseada em revestimentos à base de ligas de Zr está se aproximando de seu limite de desempenho. Assim, uma ampla gama de conceitos de reatores avançados estão em desenvolvimento ativo em todo o mundo. Esses conceitos avançados visam a oferecer melhor desempenho (eficiência e utilização de recursos) e maior segurança e, portanto, melhor economia do que os atuais LWR. Quase nenhum desses conceitos de reator avançado pretende utilizar ligas à base de Zr como revestimento de combustível ou como qualquer componente estrutural. Em relação à aplicação de Zr em LWR, quaisquer ganhos adicionais substanciais na queima de combustível são limitados pela afinidade inerente do zircônio pelo hidrogênio. A suscetibilidade das ligas à base de Zr à degradação severa impõe limites bastante restritos tanto às possibilidades de carregamento do núcleo quanto à flexibilidade na operação do reator.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Discussão

Ganhos parciais fornecem tempo de enfrentamento adicional

A principal motivação para a transição de ligas à base de Zr para materiais de revestimento ATF é reduzir a taxa de geração de calor no núcleo. Essa transição não resolve a suscetibilidade final dos núcleos LWR com sistemas de segurança ativos à degradação além dos acidentes da base de projeto. Quando a perda da capacidade de resfriamento é severa, as condições adiabáticas descrevem melhor a evolução da temperatura central. Em tal cenário, uma menor taxa de geração de calor apenas atrasa o início da degradação do núcleo. No entanto, essa menor taxa de geração de calor terá um impacto positivo na progressão do acidente no núcleo de duas maneiras importantes.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Discussão

Revestimentos ATF não podem apresentar custo proibitivo

Atualmente, o combustível em LWR constitui ~ 20% do custo de geração de eletricidade. O custo do combustível em si é dominado (> 75%) pelo custo do urânio, sua conversão e enriquecimento. O revestimento à base de ligas de Zr constitui <3% do custo do elemento de combustível. No caso de materiais de revestimento à base de Zr e SiC/SiC, onde a absorção de nêutrons térmicos no revestimento é insignificante, apenas o custo de fabricação do combustível deve ser considerado. Não se espera que a deposição de uma camada de revestimento na superfície do revestimento aumente notavelmente o custo do combustível. No caso do revestimento à base de SiC, o custo do revestimento hoje é alto (> \$ 1000 por tubo), dominado pelas fibras de SiC de grau nuclear a ~ \$ 15.000/kg. Essas fibras são cerca de 50 vezes mais caras do que as fibras de grau cerâmico da primeira geração. O preço atual de certas fibras não reflete necessariamente seu custo de produção real e é resultado da baixa demanda devido à falta de demanda para aplicação industrial (assim como o preço Zr no início era muito alto). Estima-se que quando a demanda industrial por fibras de SiC aumentar, o preço da fibra caia bastante. Embora se espere que o custo do revestimento em si seja menor em comparação com o revestimento à base de Zr, a maior absorção de nêutrons térmicos em FeCrAl exigirá carregamento de material físsil adicional (mais urânio e enriquecimento), o que resultará em um custo adicional do elemento de combustível da ordem de 15 a 25%.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Discussão

Dados experimentais continuam sendo uma necessidade crítica

Maiores conjuntos de dados de alta qualidade são necessários para apoiar a compreensão preditiva do comportamento do combustível em todos os cenários. Este conjunto de dados, no que se refere às ligas à base de Zr, foi coletado ao longo de décadas e precisa ser replicado para as tecnologias de revestimento ATF. A necessidade de conjuntos de dados completos permanece crítica, uma vez que são facilitadores importantes para promover o nível de prontidão de tecnologia para esses sistemas de combustível avançados. Um foco particular deve ser colocado nos testes *in-pile* desses conceitos de combustível, bem como na obtenção de dados experimentais para informar o comportamento de degradação do combustível durante acidentes severos.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Conclusão

A principal motivação para o desenvolvimento de materiais de revestimento de combustível alternativo com resistência à oxidação significativamente aumentada para substituir ligas à base de Zr em LWR é atrasar e reduzir o calor e o hidrogênio gerados durante acidentes severos como resultado da oxidação do revestimento. Três conceitos principais em desenvolvimento são: o revestimento à base de Zr revestido de Cr, o revestimento de FeCrAl e o revestimento de SiC/SiC, com desempenho aprimorado em acidentes severos nessa ordem. Uma revisão do status de desenvolvimento, desafios e lacunas de dados para esses conceitos se mostra promissora, sem identificar quaisquer desafios técnicos intransponíveis.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Conclusão

Desafios: Pesquisa e desenvolvimento adicionais em áreas-chave e geração de dados experimentais de alta qualidade para evidenciar as propriedades e o comportamento de desempenho integral visando a promover o nível de preparação de tecnologia desses conceitos de revestimento para implantação em escala comercial e verificação de seus benefícios de segurança.

O desenvolvimento completo e a adoção de novas tecnologias de revestimento no âmbito do conceito ATF provavelmente irão melhorar a economia de modo global do ciclo do combustível e mostrar que a indústria nuclear está adotando novos materiais e tecnologias, abrindo caminho para outros sistemas nucleares avançados.

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

Pastilha combustível

Atualmente, os fornecedores de combustível estão pesquisando e testando pastilhas de combustível que misturam outros materiais, conhecidos como dopantes, à pastilha durante o seu processo de fabricação. Esses dopantes alteram as propriedades físicas da pastilha resultante.

As principais vantagens das pastilhas "dopadas" sobre os projetos existentes incluem:

- Aumento da condutividade térmica do combustível para melhorar a transferência de calor;
- Redução da rigidez da pastilha de combustível para reduzir o risco de danos ao revestimento, o que pode dar margem a rotinas de operação da planta mais flexíveis; e
- Aumento do tamanho de grão para promover uma maior retenção do gás de fissão dentro da pastilha de combustível, o que pode diminuir a quantidade de gases radioativos que seriam liberados durante um acidente postulado.

Principais dopantes:

- Cr_2O_3
- BeO
- Al_2O_3



Resultados:

- Menor liberação de gases de fissão
- Aumento nas margens para ocorrência de PCMI
- Melhor resistência a corrosão

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

IAEA - Coordinated Research Program

Fuel Modelling under Accident Condition (FUMAC)

Avaliação de ferramentas computacionais aplicadas à análise de desempenho do combustível nuclear em condições de acidente (LOCA e RIA).

Período: 2015-2018

Relatório Consolidado: *Fuel Modelling in Accident Conditions (FUMAC, Vienna: IAEA, 2019 (IAEA-TECDOC-1889).*

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

IAEA - Coordinated Research Program

Analysis of Options and Experimental Examination of Fuels for Water Cooled Reactors with Increased Accident Tolerance (ACTOF)

The objectives and scope of the IAEA CRP on Analysis of Options and Experimental Examination of Fuels for Water Cooled Reactors with Increased Accident Tolerance (ACTOF) were the acquisition of data through experiments on new fuel types and cladding materials, development of modelling capacity to predict the behaviour of the components and the integral performance of accident tolerant fuel designs under normal and transient conditions and to demonstrate improvements under severe accident conditions. The goal was to provide information to Member States on the choices available to improve the safety of Nuclear Power Plants under normal and accident conditions.

Período: 2015-2019

Relatório Consolidado: *Analysis of Options and Experimental Examination of Fuels for Water Cooled Reactors with Increased Accident Tolerance (ACTOF)*, Vienna: IAEA, 2020 (**IAEA-TECDOC-1921**).

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES

IAEA - Coordinated Research Program

Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels (ATF-TS)

IAEA CRP aims to benchmark fuel codes against new test data either obtained during the CRP or from existing data relevant to advanced fuel and cladding concepts from Member States' experimental Programs; moreover, to develop LOCA evaluation methodology for ATF performance with a view for NPP applications.

Início: JAN2021

6. SUMMARY OF PROPOSED RESEARCH:

The proposed research is related to develop and improve calculation capability of TRANSURANUS fuel performance code in order to consider potential systems (fuel and cladding) to be applied in the framework of the Advanced Technology Fuels (ATF). The research will be conducted considering all data and information made available in open literature as well as data obtained from experiments to develop models and correlations suitable for different ATF fuel and/or cladding materials. The emphasis of the research will be to improve the code calculation under accident scenarios; however, the research can also contribute to increase understanding of ATF performance under steady state and transients. Additionally, it will be performed independent calculations and comparisons with other fuel performance codes under modification to fulfill design evaluation and licensing assessments. As complementary activity, some mechanical test and corrosion experiments will be carried out considering ATF cladding samples.