

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SiC/SiC-КОМПОЗИТОВ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ (ПО АНАЛИЗУ МЕЖДУНАРОДНЫХ БАЗ ДАННЫХ INIS, MSCl, INSPEC)

*В.С. Войценья, А.Г. Шенелев, Т.А. Пономаренко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
г. Харьков, Украина; E-mail: voitseny@kipt.kharkov.ua*

Представлен статистический анализ публикаций, введенных в Международные Базы Данных и краткий обзор состояния разработок SiC/SiC-композитов, а также их свойств, привлекательных для использования этих материалов в демонстрационном термоядерном реакторе и в атомных реакторах IV поколения.

В последние годы после завершения разработки проекта экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) все большее внимание уделяется проектам демонстрационного термоядерного реактора (ДЕМО). В то время, как проект ИТЭР в основном базируется на существующих и апробированных конструкционных материалах, создание ДЕМО требует проведения обширной программы поиска и разработки новых материалов. Это связано с тем, что в ДЕМО условия работы многих внутренних узлов и конструкций будут существенно более «суровыми» по сравнению с условиями в ИТЭРе. Например, значительно увеличится тепловая нагрузка на первую стенку за счет большей плотности как потока нейтронов, так и потока электромагнитного излучения. Среди разрабатываемых материалов, одними из наиболее перспективных для использования в качестве материала первой стенки и blankets, являются композиты SiC/SiC.

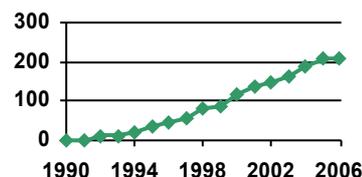
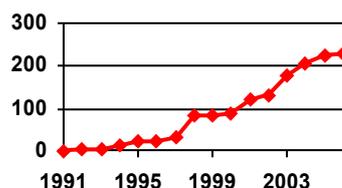
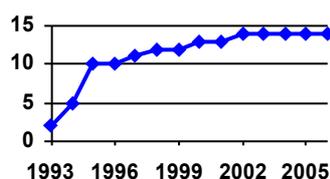
Для выявления динамики развития исследований в этой области был проведен статистический анализ количества публикаций, посвященных

проблеме использования SiC/SiC в программах по разработке термоядерных реакторов. Проводился автоматизированный поиск информации в специализированных Базах Данных INIS (1970-2006 гг.) и MSCl (1991-2006 гг.), а также в Базе Данных универсального характера INSPEC (1969-2006 гг.). Некоторые результаты поиска приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

Заметим, что применению SiC/SiC для атомных реакторов следующего поколения посвящено всего 24 работы в INSPEC, 13 - в MSCl (в INIS такие работы вообще отсутствуют), хотя многие требования к свойствам SiC/SiC являются одинаковыми для реакторов деления и синтеза. Возможным применениям SiC в атомных реакторах посвящено 389 работ в Базе Данных INSPEC, 43 - в MSCl, и 289 - в INIS.

Из рис. 1 видно, что публикации по разработке и свойствам SiC/SiC в применении к созданию термоядерных реакторов появились примерно с 1990 г.



Информационный запрос	Количество публикаций		
	INIS	MSCl	INSPEC
SiC	3826	21722	37489
SiC/SiC	20	610	873
SiC and fusion	843	389	806
SiC/SiC and fusion	14	199	209

За последние 10 лет в ходе создания SiC, упроченного волокнами SiC, использовались методы CVI (Chemical Vapor Infiltration), PIP (Polymer precursor Impregnation and Pyrolysis), MI (Melt Infiltration) и HP (Hot Pressing). Сейчас наилучшие ре-

б

в

Рис. 1. Кумулятивный рост числа публикаций, введенных в Базы Данных, по проблеме разработки SiC/SiC для термоядерных реакторов: а – INIS; б – MSCl; в – INSPEC

зультаты по свойствам SiC/SiC достигнуты методом NITE (Nano-powder Infiltration and Transient Eutectic Phase), предложенным недавно в Японии [1,2]. Он заключается в пропитке ткани из жгутов волокон SiC наноразмерными порошками  $\beta$ -SiC в присутствии незначительных количеств  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  и  $SiO_2$  с последующим горячим прессованием при  $T=1750...1800$  °C и давлении 15...20 МПа. Этот тех-

нологический процесс обеспечивает образование плотных кристаллических волокон и матрицы с близкими размерами зерен. Для получения высоких свойств композита значительную роль играет чистота и кристалличность волокон.

Анализ Баз Данных выявил, что большинство работ выполнено в Японии и США (~63 и 79 %), за ними следует Италия и Германия (~14 и 22%).

Из анализа следует, что исследования в области разработки таких композитов для использования их в термоядерных и высокотемпературных атомных

реакторах развиваются очень интенсивно. С одной стороны, идет развитие и совершенствование технологий получения SiC/SiC-материалов с целью приближения к требованиям, предъявляемым к таким материалам (табл. 2) для их использования в качестве составных частей внутренних элементов термоядерного реактора. С другой стороны, проводятся эксперименты по моделированию воздействия условий термоядерного реактора (высокие температуры, нейтронное облучение, бомбардировка атомами изотопов водорода и ионами гелия и т.д.).

Таблица 2

Свойства композита SiC/SiC, полученного по методу NITE, по сравнению с требуемыми для длительной эксплуатации термоядерных реакторов [2]

Ключевые свойства SiC/SiC	Требуемые значения [3]	Значения на образцах, полученных по методу NITE
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	~3000	2800...3000
Пористость, %	~5	3...6
Модуль Юнга, ГПа	200...300	190...230
Коэффициент теплового расширения, К <sup>-1</sup>	4x10 <sup>-6</sup>	(3,3...4,7) x 10 <sup>-6</sup> при 20...1000°C
Теплопроводность по толщине, Вт/мК	~ 20	17...29 при 20°C * 15...20 при 1000°C *
Максимальное допустимое напряжение, МПа	~ 190	~ 150 **
Цена, \$/кг	≤ 400	~ 5000 ***

\* Необлученный; \*\* 2/3 предела упругости при растяжении; \*\*\* оценка для 10-килограммовой партии.

SiC/SiC-композит состоит из нескольких компонентов (SiC-волокна, SiC-матрица и переходной слой, однородный или не однородный химически), которые имеют различные температурные и радиационные зависимости физико-механических свойств. Поэтому при разработке и совершенствовании таких материалов большое внимание уделяется оптимизации свойств каждого из компонентов. Экспериментально было показано, что наилучшие характеристики имеют SiC/SiC-композиты, максимально стехиометричные (соотношение между Si и C близко к единице), содержащие минимальное количество кислорода, с максимально достижимым уровнем кристалличности [4].

Привлекательными свойствами таких композитов являются: хорошая сопротивляемость при высоких температурах излому, ползучести, коррозии, стойкость к термическим ударам, а также трещиностойкость, стабильность термомеханических и химических характеристик в широком диапазоне изменения температур, низкое распухание при облучении в области высоких температур, низкая наведенная активность (по сравнению с другими возможными конструкционными материалами) и быстрое ее уменьшение со временем.

Рассмотрим некоторые результаты исследований поведения SiC/SiC-композитов в условиях, имитирующих условия в термоядерном реакторе.

### ВЫСОКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Одним из недостатков SiC и разработанных SiC/SiC-композитов является уменьшение с ростом температуры некоторых важных эксплуатационных

характеристик, в частности теплопроводности [5] и прочности [6]. Усилия разработчиков в последние годы были направлены на поиск технологий, с помощью которых можно устранить эти недостатки (например, [1, 2, 7, 8]). В результате были получены [8] материалы, теплопроводность которых при высоких температурах, как и некоторые другие свойства, почти удовлетворяют требованиям [2,3], необходимым для использования их в термоядерном реакторе. На рис. 2 приводится сравнение коэффициента качества в отношении термических напряжений для трех новых SiC/SiC-композитов и для двух жаропрочных сталей [7].

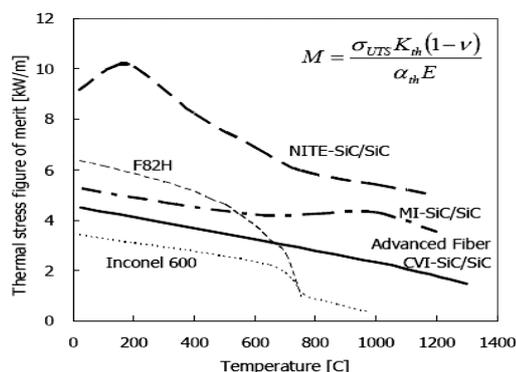


Рис. 2. Температурная зависимость показателя качества термических напряжений необлученных жаропрочных материалов [7]

### НЕЙТРОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Как отмечалось, SiC/SiC-композиты – химически неоднородный материал, и влияние нейтронного облучения в реакторе будет различным [9] для различных составляющих. Это касается скоростей ядерных реакций с накоплением H и He в Si и C соответственно; скоростей набухания компонент с различным содержанием Si и C (например, SiC-нитей и обогащенного углеродом промежуточного слоя); скорости выгорания Si и C, что приводит к нарушению стехиометрии и т.д. Накопление газов и структурных дефектов вызывает набухание, скорость которого для некоторых типов SiC/SiC-композитов оказывается различной для разных компонент, что влечет за собой существенное ухудшение механических свойств. Кроме того, ядерные реакции, обусловленные нейтронами, ведут к накоплению Al, Mg, Li и Be, что со временем может сказаться на свойствах материала. В то же время важным для использования SiC/SiC-композитов в реакторе ДЕМО является существенное снижение объемного набухания с ростом температуры (рис. 3).

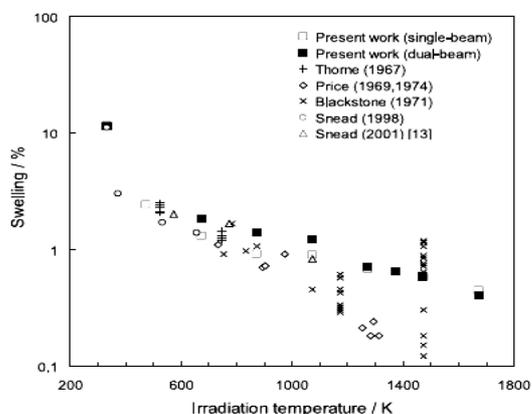


Рис. 3. Распухание SiC при нейтронном облучении до 3 сна при указанных температурах по данным различных авторов [8]

Наибольшую стойкость к нейтронному облучению обнаруживают SiC/SiC-композиты, кристаллические SiC-нити которых имеют почти стехиометрический состав (отношение Si/C  $\approx$  1,05) и малое содержание кислорода ( $\sim$ 0,2 мас. %) [10]. При реакторном облучении нейтронами до уровня  $\sim$ 10 сна ( $1 \cdot 10^{26}$  нейтр./м<sup>2</sup>) в области температур ниже 1000 °C не наблюдалось ухудшения механических свойств (модуль изгиба, прочность на изгиб, предел пропорциональности). В этих экспериментах промежуточный слой SiC/SiC-композита состоял из углерода. Замена его на слой с преобладанием кремния, по-видимому, позволит получить композит еще более стойкий к нейтронному воздействию.

### БОМБАРДИРОВКА АТОМАМИ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Такого рода эксперименты проводятся с целью имитации поведения SiC/SiC-композитов в качестве материала первой стенки термоядерного реактора,

которая будет подвергаться бомбардировке атомами перезарядки (атомы дейтерия и трития с широким распределением по энергиям). В [11] проводилось сравнение результатов по внедрению и десорбции ионов дейтерия с энергией 1,7 кэВ в SiC/SiC-композит, полученный методом NITE, и в CFC (carbon fiber composite); авторы [12] сравнили свои результаты по внедрению и десорбции ионов D<sub>2</sub><sup>+</sup> с энергией 0,5 кэВ в  $\beta$ -SiC с результатами в [13] по внедрению ионов D<sub>2</sub><sup>+</sup> с энергией 1,0 кэВ в пиролитический графит. По-видимому, различия в условиях экспериментов обусловили и существенное различие в выводах этих публикаций: оптимистичного для SiC в [11] и пессимистичного в [12]. Очевидно, необходимо проведение дополнительных экспериментов для выяснения перспектив использования SiC/SiC-композитов в качестве материала первой стенки термоядерного реактора. Явным преимуществом SiC/SiC по сравнению с CFC является существенно более низкая скорость эрозии за счет химического распыления атомами изотопов водорода, как показано в работе [14].

### ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ

Из-за низкой химической активности и высокотемпературной стойкости SiC/SiC-композитов, предполагается их использовать для вывода тепла из blankets термоядерного реактора с He охлаждением. Для этого материал трубок, через которые прокачивается газообразный гелий, должен обладать низкой He-проницаемостью. Исследования различных SiC/SiC-материалов [15], показали, что для композита, полученного методом NITE, проницаемость He при комнатных температурах находится на уровне  $4 \cdot 10^{11}$  м<sup>2</sup>/с, что на несколько порядков ниже значений проницаемости, типичных для материалов, полученных с помощью других технологий (PIP, HP, PIP+MI). Это дает основание рассматривать этот материал как весьма перспективный для использования в blankets.

Отметим также довольно хорошую совместимость SiC с материалами “начинки” blankets [16]: Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, LiZrO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>, Pb-17Li.

### ВОЗМОЖНОСТЬ ПАЙКИ SiC/SiC КОМПОЗИТОВ

Существующие технологии позволяют изготавливать заготовки SiC/SiC-композитов только сравнительно простых форм (рис. 4).



Рис. 4. Различные формы композита SiC/SiC, полученного по методу NITE [2]

Поэтому практически для любой схемы их использования должны быть разработаны методы, обеспечивающие соединения (типа винтовых, что показаны на рис.5 для трубок с внутренним  $\varnothing$  10 мм), которые были бы надежны в агрессивных условиях их эксплуатации. Рассматриваются герметизирующие материалы как на основе SiC [17], так и на основе эвтектических сплавов (Si-Ti, Si-Cr) [18].

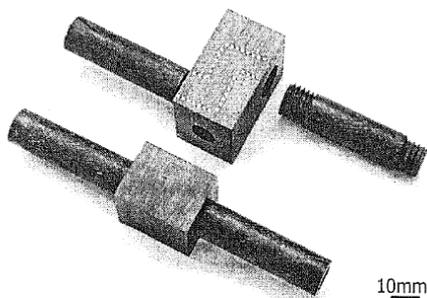


Рис. 5. Винтовое соединение SiC/SiC [4]

### СТОИМОСТЬ

Стоимость новых SiC/SiC-композитов пока что очень велика (~ \$5000 за 1 кг) [18]. Однако авторы разработки ожидают, что при массовом производстве стоимость может снизиться на порядок величины, т.е. до приемлемого уровня (рис. 6).

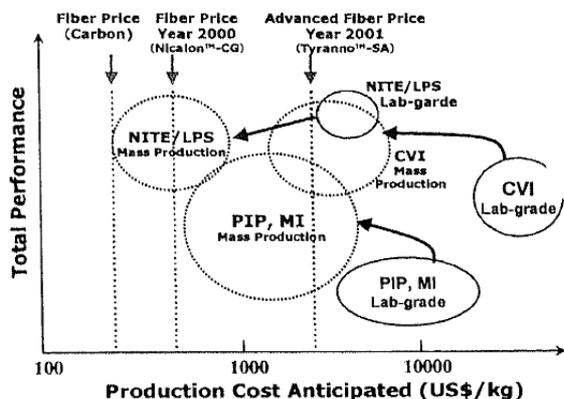


Рис. 6. Тенденции изменения стоимости [19]

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем кратком обзоре затронуты только наиболее существенные с точки зрения авторов аспекты возможного использования SiC/SiC-композитов в термоядерных исследованиях, но многие вопросы, связанные с разработкой SiC/SiC-композитов и перспективами их применением в ДЕМО остались за рамками обзора. Приводимый перечень литературы содержит дополнительную информацию по обсуждаемым проблемам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Katoh et al. // *Ceram. Transact.* 2002, v. 144, p. 77.
2. Y. Katoh et al. // *J. Nucl. Mater.* 2004, v. 329-333, p. 587.
3. A.R. Raffray et al. // *Fusion Engin. Design.* 2001, v. 55, p. 55.
4. T. Hinoki et al. // *Ann. Chim. Sci.Mat.* 2005, v. 30 (6), p. 659.
5. T. Maruyama et al. // *J. Nucl. Mater.* 2004, v. 329-333, p. 1022.
6. R. Naslain // *Composite Sci. Techn.* 2004, v. 64, p. 155.
7. Y. Katoh et al. // *Fusion Sci. Techn.* 2003, v. 44, p. 155.
8. A. Kohyama // *Key Eng. Mater.* 2005, v. 287, p. 16.
9. M.E. Sawan et al. // *Fusion Sci. Techn.* 2003, v. 44, p. 150.
10. T. Hinoki et al. // *Materials Transact.* 2002, v. 43, p. 617.
11. T. Hino et al. // *Ceram. Transact.* 2002, v. 144, p. 353.
12. Y.Oya et al. // *Materials Transact.* 2005, v. 46, p. 552.
13. Y. Morimoto et al. // *J. Nucl. Mater.* 2003, v. 313-316, p. 595.
14. T. Hino et al. // *Paper FTP1/08 at 18th Fusion Energy Conf.*, October 2000, Sorrento, Italy.
15. T. Hino et al. // *Fusion Sci. Techn.* 2003, v. 43, p. 184.
16. A. Hasegawa et al. // *J. Nucl. Mater.* 2000, v. 283-287, p. 128.
17. Ch.A. Lewinsohn et al. // *J. Nucl. Mater.* 2002, v. 307-311, p. 1232.
18. B. Riccardi et al. // *J. Nucl. Mater.* 2002, v. 307-311, p. 1237.
19. A. Kohyama et al. // *Ceramic. Transact.* 2002, v. 144, p. 3.

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ SiC/SiC-КОМПОЗИТИВ В ТЕРМОЯДЕРНИХ РЕАКТОРАХ  
(ПО АНАЛІЗУ МІЖНАРОДНИХ БАЗ ДАНИХ INIS, MSCl, INSPEC)**

*В.С. Войцєня, А.Г. Шєпєлєв, Т.А. Пономарєнко*

Подано статистичний аналіз публікацій, що введені в Міжнародні Бази Даних, і короткий огляд стану розробок SiC/SiC-композитів, а також їх властивостей, привабливих для використання цих матеріалів в демонстраційному термоядерному реакторі та в атомних реакторах IV покоління.

**PROSPECTS OF UTILIZATION OF SiC/SiC-COMPOSITES IN FUSION REACTORS (FROM  
ANALYSIS OF INTERNATIONAL DATABASES INIS, MSCl, INSPEC)**

*V.S. Vojtsenya, A.G. Shepelev, T.A. Ponomarenko*

The paper presents: a statistical analysis of publications introduced into the International DataBases on SiC/SiC composites as well as a short review on the state of the art of their development, and on the properties that are attractive for application of these materials in a demonstrational thermonuclear reactor and in Generation IV fission reactors.