



# СОЗДАНИЕ ТРУБ-ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

## CREATION OF TUBE SHELLS FOR FUEL ELEMENTS USING COMPOSITE MATERIALS BASED ON SILICON CARBIDE

УДК 621.039.548, ВАК 05.14.03, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.73.3.60.67

Ф.Макаров\*, А.Пономаренко\*, Р.Захаров\*, И.Дзюбинский\*, С.Иванов\*, А.Глебов\*, М.Лебедев\* / FVMakarov@bochvar.ru  
F.Makarov\*, A.Ponomarenko\*, R.Zakharov\*, I.Dzyubinsky\*, S.Ivanov\*, A.Glebov\*, M.Lebedev\*

**Авария на АЭС в Фукусиме в 2011 году показала особую опасность паро-циркониевой реакции, возникающей при повышении температуры оболочек твэлов из-за потери теплоносителя. В связи с этим особую актуальность приобрели программы по разработке новых материалов твэлов, устойчивых к авариям такого рода и способных существенно повысить безопасность атомных реакторов.**

The nuclear accident in Fukushima in 2011 showed special danger of steam-zirconium reaction that occurs when the temperature of the fuel element shell rise due to loss of coolant. In this regard, the programs on the development of new materials for fuel elements, which are resistant to accidents of this kind and able to significantly improve the safety of nuclear reactors, are of particular relevance.

Одними из наиболее перспективных материалов для использования в ядерных реакторах в качестве оболочек тепловыделяющих элементов вместо циркониевых сплавов в последние годы считаются композиты на основе карбида кремния. Сегодня научные разработки в данной сфере ведутся во Франции, Японии, Южной Корее, Китае и США [1]. В Российской Федерации работы по созданию труб-оболочек твэлов из композиционных материалов на основе карбида кремния ведет ГК "Росатом" и его головной материаловедческий институт ВНИИНМ.

### SiC VS. ZR

Переход от топливной оболочки из циркониевого сплава к карбидокремниевому композиционному материалу (SiC / SiC) является сложной задачей, требующей больших изменений в технологии реакторных материалов.

Сплавы циркония обладают малым сечением захвата тепловых нейтронов, удовлетворитель-

ной теплопроводностью, высокой прочностью при нормальных условиях эксплуатации. Но аварийное повышение температуры оболочки твэлов выше 600 °С приводит к началу паро-циркониевой реакции с выделением из воды водорода и образованием взрывоопасной газовой смеси [2]. Использование карбида кремния в качестве основного материала для топливной оболочки позволяет исключить возможность образования взрывоопасной смеси, так как данный материал обладает достаточно низкой кинетикой окисления и высокой температурой плавления.

В таблице представлено сравнение основных физико-химических свойств циркониевого сплава и SiC [3].

Как видно из таблицы, карбид кремния обладает более высокой механической прочностью, износостойкостью, твердостью, теплопроводностью, а также хорошей коррозионной

\* Высотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А.Бочвара (ВНИИНМ) / Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials (VNIINM).



Сравнение свойств, применяемого в атомной промышленности циркониевого сплава Э110 с композиционным материалом на основе SiC

Comparison of properties of E110 zirconium alloy used in the nuclear industry with composite material based on SiC

Свойства материала Material properties	Сплав Э110 (Zr – 1% Nb) E110 alloy (Zr – 1% Nb)	Карбид кремния (SiC/SiC композит) Silicon carbide (SiC/SiC composite)
Температура плавления, °C Melting point, °C	1860	2800
Теплопроводность при 50 °C, Вт/(м·К) Thermal conductivity at 50 °C, W/(m·K)	7,5	25–10
Предел прочности при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	270	240–350
Сечение захвата тепловых нейтронов, барн/атом Capture cross section for thermal neutrons, barn/atom	0,18	0,13
Модуль упругости при 20 °C, ГПа Modulus of elasticity at 20 °C, GPa	97	460
Вязкость разрушения, МПа·м <sup>0,5</sup> Fracture toughness, MPa·m <sup>0.5</sup>	240–375	3–5
Стойкость в водяном паре, °C Resistance in water vapor, °C	< 400	>1200

и радиационной стойкостью [4]. Он устойчив в водяном паре, очень слабо реагирует с кислородом при повышенных температурах и, в отличие от циркониевых сплавов, не приводит к выделению водорода с образованием взрывоопасной газовой смеси. Преимущество карбида кремния перед цирконием было подтверждено рядом исследований, где было показано, что прочность SiC/SiC-композитов остается стабильной при температурах свыше 1500 °C, в то время

как цирконий полностью утрачивает прочность при температуре 1300 °C. Кроме того, карбид кремния в экстремальных условиях показывает скорость коррозии, в 100–1000 раз меньшую, чем у циркония [5].

### КОНЦЕПЦИЯ WESTINGHOUSE

Компания Westinghouse (США) является одним из мировых лидеров в области исследований и создания технологии изготовления

In recent years, the composites based on silicon carbide are regarded as one of the most promising materials for use in nuclear reactors in the shells of fuel elements instead of zirconium alloys. Today, scientific developments in this field are underway in France, Japan, South Korea, China and the United States [1]. In the Russian Federation, Rosatom and its leading material science institute VNIINM are engaged in the creation of tube shells for fuel elements made of composite materials based on silicon carbide.

### SIC VS. ZR

The transition from the zirconium alloy fuel shell to the silicon carbide composite material (SiC/SiC) is a complex task that requires a lot of changes in the technology of reactor materials.

Zirconium alloys have a low capture cross section for thermal neutrons, satisfactory thermal conductivity, high strength under normal operating conditions. But abnormal increase in the temperature of shells of fuel elements above 600 °C leads to the beginning of the zirconium-steam reactions with the release of hydrogen from water

and formation of explosive gas mixture [2]. The use of silicon carbide as the main material for fuel element shell eliminates the possibility of formation of explosive mixture, as this material has a low oxidation kinetics and a high melting temperature.

The table presents a comparison of the main physical-chemical properties of zirconium alloy and SiC [3].

As it is shown in the table, the silicon carbide has a higher mechanical strength, wear resistance, hardness, thermal conductivity, and good corrosion

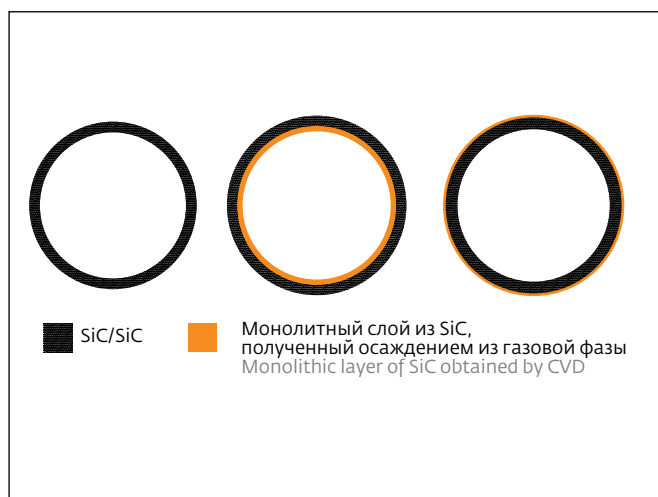


Рис.1. Варианты технологии изготовления оболочечных труб из карбида кремния, разработанные компанией Westinghouse: а – композит SiC/SiC; б – композит SiC/SiC с внутренним монокристаллическим слоем; с – композит SiC/SiC с внешним монокристаллическим слоем

Fig.1. Concepts of manufacturing of SiC tube shells developed by Westinghouse: a – SiC/SiC composite; b – SiC/SiC composite with monolithic inner layer; c – SiC/SiC composite with monolithic outer layer

оболочечных труб из композиционного материала на основе карбида кремния и занимается данным вопросом с 2004 года. После серии удачных экспериментов ученые из Westinghouse выбрали три варианта технологии изготовления оболочечных труб (рис.1), которые, по их

мнению, обеспечат соответствие требованиям, предъявляемым к оболочкам твэлов [6].

Первый вариант заключается в формировании композита из волокнистого армирующего каркаса, сплетенного из SiC-волокна под углом 45–52°, и SiC-матрицы, полученной путем жидкофазной или газофазной пропитки. Благодаря такой структуре SiC/SiC-композита исключается хрупкое разрушение и повышается прочность готового изделия. Второй и третий варианты предусматривают нанесение дополнительного защитного слоя SiC методом газофазного осаждения (CVD) на внутреннюю или внешнюю поверхность композита, изготовленного согласно первому варианту технологии. Такой слой позволит удерживать газообразные продукты деления и увеличить коррозионную стойкость изделия при взаимодействии с водяным паром, в том числе повысить его прочность, однако возможно появление проблем с геометрическими размерами оболочки. Также предлагалось совместить три предложенных варианта технологии, создав композит с внутренним и внешним защитными слоями.

Разработка вышеописанной технологии ведется в рамках проекта ATF (Accident-tolerant fuel – устойчивое к авариям топливо). По последним данным, Westinghouse планирует освоить производство полномасштабных оболочечных твэлов из карбида кремния к 2025 году. Финансирование проекта составит более 1,5 млрд долл. США [8]. В 2016 году Westinghouse

and radiation resistance [4]. It is stable in water vapor, very weakly react with oxygen at elevated temperatures, and, in contrast to zirconium alloys does not lead to release of hydrogen with formation of explosive gas mixture. The advantage of silicon carbide in comparison with the zirconium was confirmed by a number of studies, where it was shown that the strength of SiC/SiC composites remains stable at temperatures over 1500 °C, while zirconium completely loses its strength at a temperature of 1300 °C. In addition, the silicon carbide in extreme

conditions shows the corrosion rate 100–1000 times less than that of zirconium [5].

### CONCEPT OF WESTINGHOUSE

Westinghouse (USA) is one of the world leaders in research and creation of technology for manufacturing of tube shells made of composite material based on silicon carbide, dealing with this issue since 2004. After a series of successful experiments, the scientists from Westinghouse have chosen three options of manufacturing technology of tube shells (Fig.1), which, in their opinion, will ensure compliance

with the requirements of the fuel elements [6].

The first conception is the formation of a composite with fibrous reinforcing frame woven of SiC-fiber at an angle of 45–52°, and SiC-matrix obtained by liquid-phase or gas-phase impregnation. Such a structure of SiC/SiC-composite eliminates the brittle fracture is and increases the strength of the finished product. The second and third conceptions involve the chemical vapor deposition (CVD) of a protective layer of SiC on an inner or outer surface of the composite manufactured according to the first conception

совместно с General Electric Aviation начали строительство двух заводов по производству керамоматричных композитных изделий, которые должны дать первую продукцию уже к середине 2018 года. Первый завод нацелен на производство SiC-волокна, которое на данный момент изготавливается только в Японии, второй же завод будет специализироваться на производстве композитных изделий с применением SiC-волокна [9].

В дальнейшем планируется использовать разработанные технологии в таких областях, как машиностроение, авиация, космос, оборонная промышленность, гражданский сектор и т.д.

### РОССИЙСКИЕ ИННОВАЦИИ

В период с 2011 по 2016 год учеными ВНИИНМ был проведен большой объем исследований различных методов создания оболочечных труб на основе SiC, что позволило сократить отставание от зарубежных коллег. Были исследованы следующие методы: шликерное литье; изостатическое прессование; газофазное осаждение; осаждение SiC из газовой фазы на подложку из SiC, полученную методом изостатического прессования; пропитка волокнистого каркаса из SiC кремнийорганическими прекурсорами. Полученные образцы представлены на рис.2.

При подробном изучении каждого из методов были выявлены их преимущества и недостатки. Например, методом газофазного осаждения получают трубки с наименьшим значением

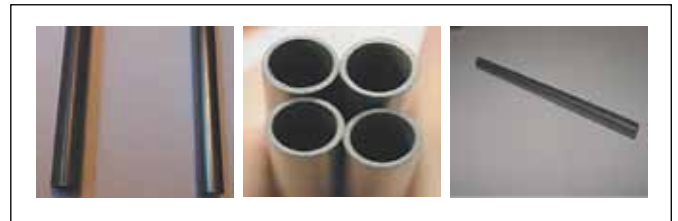


Рис.2. Образцы труб-оболочек твэлов из композиционных материалов на основе карбида кремния, полученные во ВНИИНМ  
Fig.2. Samples of tube shells of fuel elements obtained in VNIINM using SiC-based composite materials

пористости (0,6%), высоким значением прочности (250–275 МПа), но такие образцы подвержены хрупкому разрушению. В свою очередь, метод пропитки волокнистого каркаса из SiC кремнийорганическими прекурсорами позволяет избежать хрупкого разрушения, но образцы имеют высокую пористость и низкую прочность.

Проанализировав полученные результаты, во ВНИИНМ пришли к выводу, что соответствие оболочечных труб предъявляемым требованиям может быть достигнуто только при совмещении нескольких технологий, что позволит создать многослойный композит на основе  $\beta$ -SiC, как показано на рис.3.

Трехслойная керамическая оболочка обеспечивает оптимизацию свойств внутреннего монолита для удержания газообразных продуктов деления, укрепление волокнами матрицы

of the technology. This layer will help to retain gaseous fission products and to increase the corrosion resistance of the product when interacting with water vapor, in particular, to increase its strength, however, may cause problems with the dimensions of the shell. It was also suggested to combine the three proposed conceptions of this technology, creating a composite with inner and outer protective layers.

The development of the described above technology is a part of ATF (Accident-tolerant fuel) project. According to recent reports, Westinghouse plans to

develop the production of full-scale silicon carbide tube shells for fuel elements by 2025. Funding for the project will amount to more than 1.5 billion USD [8]. In 2016, Westinghouse and General Electric Aviation began construction of two plants for the manufacturing of ceramic-matrix composites, which should give the first products by mid 2018. The first factory is aimed at production of SiC fiber, which is currently manufactured only in Japan, the second factory will specialize in the production of composite products with the use of SiC fiber [9].

Further it is planned to use the developed technologies in such areas as mechanical engineering, aviation, aerospace, defense industry, civil sector, etc.

### RUSSIAN INNOVATIONS

In the period from 2011 to 2016 VNIINM's scientists have carried out a large number of studies of different methods of creating a tube shells based on SiC, which allowed to reduce the gap with their foreign counterparts. The following methods were investigated: slip casting; isostatic pressing; vapor deposition; deposition of SiC on a SiC substrate, obtained

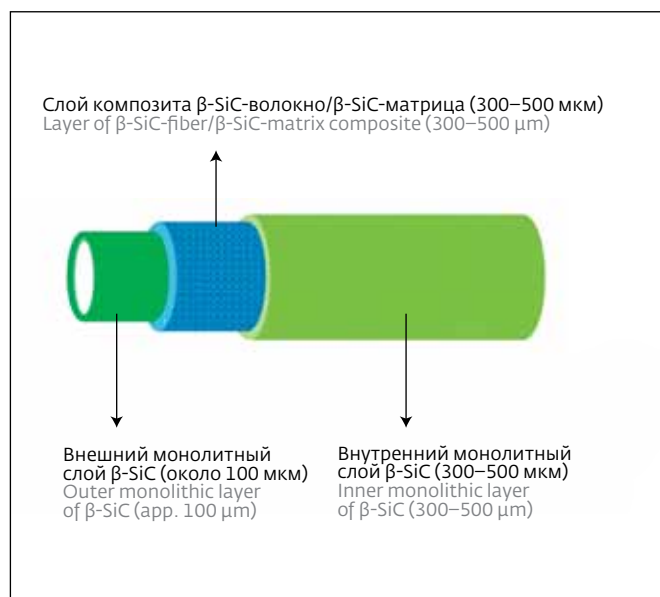


Рис.3. Схема трехслойной трубчатой SiC/SiC-оболочки  
Fig.3. Scheme of three-layer tubular SiC/SiC shell

для повышения механических характеристик и внешнего монокристаллического слоя для сопротивления коррозии. Представленная принципиальная схема схожа с американской концепцией, но все же имеются различия, которые связаны, в основном, с технологией создания среднего композиционного слоя.

Если американские ученые остановили свой выбор на биаксиальном плетении ( $45 \times 45^\circ$ ) волокнистого каркаса [10] (образцы с такой

архитектурой лучше сопротивляются нагрузкам на кручение), то во ВНИИНМ рассматривают варианты с использованием триаксиального плетения, или с комбинированной архитектурой плетения, которая будет в том числе сопротивляться нагрузкам на изгиб, что увеличит прочность готового изделия (рис.4). Исследования по данному вопросу планируется закончить в 2017 году.

Архитектура плетеного каркаса оказывает значительное влияние на свойства готовых изделий, предотвращая хрупкое разрушение и обеспечивая повышение механических свойств, но качество пропитки плетеного каркаса имеет не меньшее значение. Одним из ключевых качеств готового изделия является его закрытая пористость, уровень которой должен быть минимален. Пористость матрицы зависит от многих факторов, в том числе от выбранного метода ее формирования и от применяемых материалов. В США используют метод жидкофазной пропитки предкерамическими олигомерами, что на выходе дает достаточно высокую пористость на уровне 6–10% [11].

В России, как и в случае с выбором архитектуры плетения, исследуется комбинированная технология. Кроме жидкофазной пропитки предкерамическими олигомерами, которые модифицированы различными металлами, во ВНИИНМ исследуют возможность применения газофазной и электрофоретической пропитки, а также усовершенствования вышеуказанных

by isostatic pressing; impregnation of the SiC fibrous frame by silicon-organic precursors. The obtained samples are shown in Fig.2.

At detailed study of each method their advantages and disadvantages were identified. For example, tubes obtained by vapor deposition have the lowest value of porosity (0.6%), high value of strength (250–275 MPa), but such samples are susceptible to brittle fracture. In turn, the method of impregnating the fibrous SiC frame by silicon-organic precursors allows to avoid brittle fracture, but the

samples have high porosity and low strength.

After analyzing the results, VNIINM come to the conclusion that the compliance of tube shells to the requirements can only be achieved by combining several technologies that will allow to create multi-layered composite based on  $\beta$ -SiC, as shown in Fig.3.

Three-layer ceramic shell provides optimization of the properties of the internal monolith for containment of gaseous fission products, the strengthening of the fiber matrix to enhance the mechanical characteristics and outer monolithic layer for

corrosion resistance. Presented schematic diagram is similar to the American concept, but there are some differences, which are associated mainly with the technology of a middle composite layer.

If the American scientists have chosen biaxial weaving ( $45 \times 45^\circ$ ) of fibrous frame [10], since samples with such architecture better resist torsional loads, VNIINM considers the use of triaxial weaving or mixed-architecture weaving, which will, in particular, to resist loads in bending that will increase the strength of the finished product (Fig.4). The study of

методов путем использования вибрационных и ультразвуковых колебаний. Рассматриваемые варианты позволяют повысить плотность и равномерность заполнения матрицы по всей длине изделия по сравнению с жидкофазной пропиткой.

В настоящее время специалистами ВНИИНМ ведутся работы по нанесению на волокна межфазового слоя, который компенсирует разницу тепловых расширений слоев, что при работе при повышенных температурах значительно снижает вероятность растрескивания готового изделия.

Немаловажную роль в структуре готового композита играет SiC-волокно. На данный момент технологией изготовления стехиометрического  $\beta$ -SiC-волокна обладают США и Япония. Поставки такого волокна в нашу страну не осуществлялись. Однако, ВНИИНМ имеет серьезный задел для изготовления SiC-волокна по собственной технологии, которая, по предварительным расчетам, значительно дешевле аналогов. Ее отработка во ВНИИНМ уже началась и планируется к завершению в 2017–2018 годах.

Нельзя не отметить, что в изготовлении труб-оболочек твэлов могут быть использованы наноматериалы, которые в силу своих особенностей значительно улучшат свойства готового изделия, при этом их можно внедрять практически на каждом этапе изготовления. Например, в процессе пропитки уместно применение мелкодисперсных порошков карбида кремния

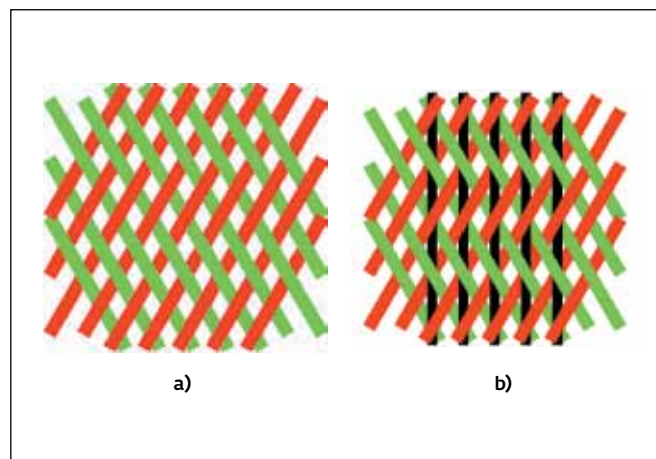


Рис.4. Варианты архитектуры плетения: а – биаксиальное; б – триаксиальное

Fig.4. Weaving architectures: a – biaxial; b – triaxial

высокой чистоты с целью заполнения микропор для снижения закрытой пористости. Для увеличения прочности – в качестве вспомогательных элементов при нанесении межфазового слоя – возможна имплантация на  $\beta$ -SiC-волокно графена, фуллеренов или SiC-нанопроволок. Работы в данном направлении уже ведутся, но о конкретных результатах можно будет судить не ранее 2018 года.

В ближайшие годы на площадке ВНИИНМ планируется завершить создание опытно-лабораторного участка производства труб-оболочек твэлов из композиционного материала на основе

this issue is planned to finish in 2017.

Architecture of weaved frame has a significant influence on the properties of the finished products, preventing brittle fracture and ensuring the improvement of mechanical properties, but the quality of the impregnation of the braided frame is no less important. One of the key properties of the finished product is its closed porosity, which should be minimal. The porosity of the matrix depends on many factors, including the chosen method of its formation and on applied materials. In the United States the method

of liquid-phase impregnation by preceramic oligomers is used that gives a fairly high porosity at the level of 6–10% [11].

In Russia, as in the case of selecting the architecture of the weaving, the combined technology is studied. In addition to liquid-phase impregnation by preceramic oligomers that are modified with various metals, VNIINM investigates the possibility of applying gas-phase and electrophoretic impregnation, as well as improvements of the above methods by the use of vibration and ultrasound. These options allow to increase the density

and uniformity of filling in the matrix across the length of the product compared to liquid-phase impregnation.

At present, specialists of VNIINM study the deposition of interphase layer on the fibers, which compensates differences in thermal expansions of the layers and in case of operation at elevated temperatures significantly reduces the likelihood of cracking of the finished product.

SiC fiber plays an important role in the structure of the finished composite. At the moment, only USA and Japan have the technology of manufacturing



карбида кремния. При этом упор делается на возможность производства не только оболочечных труб, но и других видов композитных изделий. В процессе создания участка также планируется освоить производство  $\beta$ -SiC-волокна, которое будет востребовано во всех областях композитной отрасли в силу своих преимуществ перед углеродным волокном, в частности, в термостойкости и термостабильности. В дальнейшем проект по созданию композиционных труб-оболочек твэлов из карбида кремния должен стать составной частью более масштабной программы ВНИИНМ "Толерантное топливо" – аналога американского ATF.

### МНОГОГРАННЫЙ SiC / SiC

В настоящее время карбид кремния считается одним из наиболее перспективных материалов для производства композитов. Он имеет большой потенциал в авиакосмической отрасли, в производстве узлов и деталей газотурбинных двигателей и установок. Особенно широкое применение карбид кремния и его различные модификации нашли в конструкциях летательных аппаратов, работающих при повышенных температурах в условиях высокой нагрузки и повышенного износа. Это связано с тем, что SiC обладает высокими антифрикционными свойствами. Уже сегодня он применяется в радиальных и торцевых подшипниках скольжения, рабочих кольцах торцевых уплотнений, в том числе газодинамических. Пары скольжения

с низким коэффициентом трения способны существенно снизить энергопотребление механизмов, обеспечить высокий уровень надежности их работы и значительно повысить их долговечность [12, 13].

Композиционные изделия из карбида кремния получили большое распространение в оборонной промышленности, особенно при изготовлении различных бронезащитных элементов. Активно изучается взаимодействие этого вида композиционных изделий с кумулятивными зарядами, их сочетание с активной защитой. Исследования различных видов танковой брони показали, что применение композиционной керамики на основе карбида кремния дает ощутимый выигрыш по массе – до 30%. При этом возрастает прочность и пулестойкость изделий [14].

С учетом последних тенденций и прогнозов ведущих мировых ученых карбид кремния станет одним из основных материалов 21 века. Обладая набором уникальных свойств, он может быть использован практически во всех областях науки и техники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Южанин А., Данилова Т. Топливо будущего. Атомный эксперт. URL: <http://atomicexpert-old.com/content/toplivo-budushchego>.
2. Безумов В.Н., Захаров Р.Г., Кабанов А.А., Новиков В.В., Пименов Ю.В. Вопросы разработки оболочки твэла из композицион-

stoichiometric  $\beta$ -SiC fibers. Such a fiber has not been supplied to Russia. However, VNIINM has a strong competencies for the manufacture of SiC-fiber using its own technology that according to preliminary calculations is much cheaper than counterparts. Its development is underway in VNIINM and is scheduled for completion in 2017–2018.

It should be noted that nanomaterials can be used in the manufacture of tube shells for fuel elements, which, because of their characteristics, will significantly improve the properties of the finished product. And they can be

used at almost every stage of manufacturing. For example, the fine powders of silicon carbide of high purity can be used in the impregnation process to fill the micropores and to reduce the closed porosity. Implantation of graphene, fullerenes, or SiC nanowires on the  $\beta$ -SiC fibers as the auxiliary elements is possible when applying the interfacial layer to increase the strength. Work in this area is already underway, but the concrete results will be seen not earlier than in 2018.

In the coming years, it is planned to complete in VNIINM the creation of the experimental

laboratory division of the production of tube shells for fuel elements made of composite material based on silicon carbide. The emphasis is on the ability to produce not only tube shells, but also other types of composite products. In the process of creating the division it is also planned to master the production of  $\beta$ -SiC fiber, which is needed in all areas of the composite industry, because of its advantages over carbon fiber, in particular, in heat resistance and thermal stability. In the future, the project for the creation of composite tube shells for fuel elements made of silicon



- ного материала на основе карбида кремния в рамках концепции безопасности водоохлаждаемых реакторов в условиях аварий // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: доклады. – М.: ОАО "НИКИЭТ". 2014. Т. 1. С. 303–315.
3. **Безумов В.Н., Новиков В.В., Кабанов А.А., Захаров Р.Г., Макаров Ф.В., Пономаренко А.П.** Вопросы разработки оболочки твэла из композиционного материала на основе карбида кремния в рамках концепции безопасности водоохлаждаемых реакторов в условиях аварий // Вопросы атомной науки и техники: Материаловедение и новые материалы. 2014. № 4(79). С. 76–90.
  4. **Безумов В.Н., Захаров Р.Г., Макаров Ф.В., Пономаренко А.П.** и др. Способ изготовления керамической трубки для оболочки тепловыделяющего элемента. Патент РФ 2575863.
  5. В MIT получены результаты испытаний оболочки твэлов из карбида кремния. Интернет-портал Nuclear.ru, URL: [http://nuclear.ru/news/78867/?sphrase\\_id=5052350](http://nuclear.ru/news/78867/?sphrase_id=5052350).
  6. Accident-tolerant Fuel. Game-changing Technology for Safety, Reliability and Lower Operating Cost. Интернет-сайт компании Westinghouse Electric Company LLC URL: <http://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/Technovation%20Stuff/Accident%20Tolerant%20Fuel%20Brochure%20.pdf>
  7. **Deck C.P.** Westinghouse accident tolerant fuel. Phase 1a project. Final Report for the Period November 12, 2012 Through September 7, 2015.
  8. **Boylan F., Franceschini F., Johnson S.** and etc. Development of LWR Fuels with Enhanced Accident Tolerance; Task 4 – Preliminary Business Plan, 2013.
  9. GE Aviation to build unique materials factories, Интернет-сайт компании GE Aviation, URL: [http://www.geaviation.com/press/other/other\\_20160616.html](http://www.geaviation.com/press/other/other_20160616.html).
  10. **Daejong K., Hyun-Geun L.**, etc. Fabrication and measurement of hoop strength of SiC triplex tube for nuclear fuel cladding applications // Journal of nuclear materials. 2015. № 458. P. 29–36.
  11. **Xu P., Lahoda J.E., Hallstadius L.**, etc. SiC matrix fuel cladding tube with spark plasma sintered end plugs. Патент США № US 2015/0078505 A1.
  12. **Климов А.К., Климов Д.А., Низовцев В.Е., Ухов П.А.** Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности // Труды МАИ. 2011. Вып. 67.
  13. **Zok W.F.** Ceramic-matrix composites enable revolutionary gains in turbine engine efficiency // American Ceramic Society Bulletin. 2016. Vol. 95. № 5. P. 22–28.
  14. Бронезлементы из карбида кремния и композиционных материалов. Интернет-сайт компании АО "ЦНИИИМ", URL: <http://www.cniim.com/womenu.php?id=12>.

carbide should be an integral part of a larger program of VNIINM, "Tolerant fuel" that is similar to the American ATF.

### MULTIFACETED SIC/SIC

Currently, silicon carbide is considered as one of the most promising materials for the production of composites. It has great potential in the aerospace industry, in the manufacture of components and parts for gas turbine engines and systems. Silicon carbide and its modifications have found especially wide use in aircraft structures, operating at elevated temperatures under conditions of

high load and high wear. It is caused by high antifriction properties of SiC. Today it is used in radial and lateral slide bearings, in face seals rings including gas dynamics ones. Sliding pairs with a low coefficient of friction can significantly reduce the energy consumption of mechanisms to ensure a high level of their reliability and to increase their durability [12, 13].

Composite products made of silicon carbide are widely used in the defense industry, especially in the manufacture of various armor elements. The interaction of this type of composite

product with shaped charges, its combination with active protection is actively studied. Studies of various types of tank armor have shown that the use of composite ceramics based on silicon carbide gives a considerable (up to 30%) gain in weight. At the same time, the strength and bullet resistance of products increase [14].

According to the latest trends and forecasts the world's leading scientists, silicon carbide will become one of the main materials of the XXI century. Having a unique set of properties, it can be used in almost all fields of science and technology. ■