



# Сверхтугоплавкие карбиды при воздействии излучения мощного технологического лазера

М. А. Шейндлин, М. В. Брыкин, Т. В. Бгашева, А. А. Васин, П. С. Вервикишко, С. В. Петухов, А. М. Фролов  
Объединенный институт высоких температур РАН,  
Москва, Россия

Выполнено экспериментальное исследование поведения сверхтугоплавкого высокоплотного карбида циркония в окислительной среде (воздух). Разработана и создана специальная экспериментальная установка, включающая мощный технологический лазер для создания на поверхности карбида циркония тепловых потоков, которые позволяют изучать образование слоя окисла в широком диапазоне темпов нагрева. Применение высокоскоростной видеосъемки в отраженном свете в сочетании с многоканальной пирометрией позволило выяснить основные особенности формирования слоя окисла при различных режимах нагрева. С помощью электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа и рамановской спектроскопии подробно изучена зона воздействия лазерного излучения в окислительной среде.

**Ключевые слова:** карбид циркония, диоксид циркония, лазерный нагрев, оптическая пирометрия, высокие температуры

Статья получена: 24.01.2022  
Статья принята: 01.02.2022

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительно вырос интерес к изучению поведения так называемых сверхтугоплавких соединений, или УНТС (Ultra High

# Ultra-High Temperature Carbides Under Irradiation of the Power Industrial Lasers

M. A. Sheindlin, M. V. Brykin, T. V. Bgasheva, A. A. Vasin, P. S. Vervikishko, S. V. Petukhov, A. M. Frolov  
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The paper presents an experimental study of the behavior of high-density zirconium carbide in oxidizing atmosphere (in air flow). The study has been conducted with a specially developed experimental setup with a high-power technological laser providing heating of zirconium carbide in a wide range of heating rates, which make it possible to study the formation of an oxide layer at different regimes. High-speed video recording of the heated surface in the conditions of external illumination in combination with the multichannel pyrometry enabled to analyze the main features of the formation of the oxide layer at the surface of zirconium carbide. A detailed study of the zone of laser radiation exposure in an oxidizing atmosphere was performed using electron microscopy, X-ray diffraction and Raman spectroscopy.

**Keywords:** zirconium carbide, zirconium dioxide, laser heating, optical pyrometry, high temperatures.

Article received on: 24.01.2022  
Article received on: 01.02.2022

## INTRODUCTION

At present, interest in studying the behavior of so-called ultra-refractory compounds or UHTC (Ultra High Temperature Ceramics) when exposed to high energy flows. This study is aimed at investigation of the resistance of materials and coatings made from super-refractory transition metal carbides when exposed to high energy densities and, development



Temperature Ceramics), при воздействии высокоэнергетических потоков. Настоящий проект направлен на изучение стойкости материалов и покрытий, изготовленных из сверхтугоплавких карбидов переходных металлов, при воздействии концентрированных потоков энергии и связанную с этим разработку методов их испытаний в условиях экстремальных тепловых потоков и температур.

Карбиды переходных металлов являются наиболее тугоплавкими материалами из УНТС (они имеют температуры плавления в окрестности 4000 К и выше). Специалисты рассматривают их сегодня в качестве одного из наиболее перспективных классов материалов, способных выдержать высокие тепловые нагрузки в «безабляционном» режиме [1, 2]. Большинство из современных исследований (например, [2-3]) касаются в основном химико-технологических аспектов синтеза порошков требуемого состава и их дальнейшего высокотемпературного компактирования. Однако для создания материалов и покрытий, выдерживающих воздействие экстремальных потоков энергии, необходимо обеспечить решение цепочки взаимосвязанных задач: технология изготовления образцов материала заданного состава → изучение его свойств → испытание под воздействием высокоэнергетического потока. В настоящее время результаты изучения зависимости стойкости материалов от технологии их изготовления носят фрагментарный характер. Как правило, речь идет об исследованиях, в которых испытание изделия из спеченного порошка проводится в струе газа, нагретого в дуговом плазматроне [4]. При этом в большинстве работ отсутствует измерение температуры поверхности – важнейшего параметра, определяющего физико-химические процессы на поверхности. Это же относится и к измерениям характеристик падающего теплового потока. Поэтому сопоставление данных различных экспериментов является затруднительным. Даже в том эксперименте, когда температура поверхности испытуемого материала определялась [5], тепловой поток на поверхности оценивался весьма грубо.

Альтернативный подход – это использование мощных многокиловаттных дисковых и волоконных технологических лазеров в качестве источника высокоэнергетического потока. Здесь можно относительно просто и весьма надежно определить плотность мощности, падающую на поверхность испытуемого материала. Важно, что использование лазерного нагрева позволяет проводить

of the corresponding methods for their testing under extreme conditions.

Transition metal carbides are the most refractory UHTC materials (they have melting points in the vicinity of 4000 K and above). They are considered as one of the most promising classes of materials capable of withstanding high thermal loads in a “non-ablative” regimes [1, 2]. Most of the recent studies (e. g. [2-3]) mainly concern the chemical – and technological aspects of the synthesis of powders of the required composition and their further high-temperature sintering. However, in order to create materials and coatings that can withstand extreme energy fluxes, one have to solve a number of interrelated tasks: the manufacturing of samples of a given composition → studying their properties → testing under the influence of a high-energy fluxes. At present, the results of studying the dependence of the resistance of materials on the technology of their manufacture are fragmentary. As a rule, we are talking about studies in which the testing of a sample is carried out in a plasmatron gas jet [4]. At the same time, in most studies there is no measurement of the surface temperature, which is the most important parameter that determines the physicochemical processes on the surface. The same is related to measurements of the characteristics of the applied heat flux. Therefore, the latter makes it difficult to compare data from different experiments. Even in the experiment where the surface temperature of the test material was directly measured [5], the heat flux on the surface was estimated very roughly.

An alternative approach is the use of the power multi-kilowatt disk or the fiber technological lasers as a source of high-energy fluxes. Here one can relatively easy and quite reliably determine the laser power density at the surface of the testing sample. It is important that the use of laser heating makes it possible to test materials at heat flows inaccessible to electric arc heaters or gas burners and, most importantly, in conditions of an almost uniform distribution of power density over the heating spot, which is achieved by using optical fibers for delivery of laser radiation to the focusing optics. In addition, that makes it possible to program the time power shape arbitrary, which broaden the possibilities for using laser radiation for the high-temperature testing of the UHTS materials.

It is important to note that such tests can be carried out in various gas environments, as well as in vacuum. In the latter case, it is possible to obtain important information about both the high-temperature release of molecular products and to study the



испытание материалов при тепловых потоках, недоступных для электродуговых подогревателей или газовых горелок и, что особенно важно, в условиях практически однородного распределения плотности мощности по пятну нагрева, что достигается применением световодов для «доставки» излучения к фокусирующей системе и применением специальной фокусирующей оптики. Кроме того, можно изменять мощность во времени произвольным программируемым способом, что значительно расширяет круг возможностей использования лазерного излучения для испытания материалов.

Важно отметить, что такие испытания можно проводить в различной газовой среде, а также в вакууме. В последнем случае удастся получить важные сведения как о высокотемпературном выходе молекулярных продуктов, так и о молекулярном составе пара при высокотемпературном испарении материала [6,7]. Использование мощного лазерного излучения для изучения поведения сверхтугоплавких керамик при экстремальном тепловом воздействии можно рассматривать как один из наиболее очевидных способов. Несмотря на это, в настоящее время говорить об отработанности такой технологии нельзя. В современной литературе содержатся единичные упоминания о соответствующих специально созданных установках, например [8].

При испытании материалов на такой установке [9] использование одного – двух стандартных пирометров является определенно недостаточным условием. Действительно, вопрос о достоверном измерении температуры поверхности в таких экспериментах является первоочередным: здесь использование яркостной (монокроматической) пирометрии приводит к большим ошибкам, в основном из-за неизвестного значения излучательной способности материала при высокой температуре в условиях сложных процессов на поверхности – например плавления или химической реакции. Использование бихроматического (цветового) пирометра, который, по мнению ряда авторов [6], позволяет более точно определить истинную температуру (что, по меньшей мере, недостаточно обоснованно) приводит к существенным и трудно прогнозируемым ошибкам. Если в случае изучения углеродных материалов, являющихся достаточно «серыми» излучателями, бихроматическая пирометрия не приводит к фатальным ошибкам, то для карбидных и нитридных материалов ошибка при температурах, близких к температурам плавления

молекулярной композиции пара во время высокотемпературной испарения материала [6, 7]. Использование высокой мощности лазерного излучения для изучения поведения UHTS керамики под воздействием высокой энергии можно считать одним из самых очевидных способов. Однако, на сегодняшний день, существует очень ограниченное количество публикаций, касающихся данного вопроса (см., например, [8]).

При испытании материалов, например, в установке, описанной в [9], использование одного или двух стандартных пирометров не является достаточным. Действительно, проблема надежного измерения температуры поверхности в таких экспериментах имеет первостепенное значение – здесь использование яркостной (монокроматической) пирометрии приводит к большим ошибкам, в основном из-за неизвестного значения коэффициента излучения материала при высокой температуре в условиях сложных процессов на поверхности, например, плавления или возможных химических реакций. Использование бихроматического (цветового) пирометра, который, по мнению ряда авторов [6], позволяет более точно определить истинную температуру (что, по меньшей мере, недостаточно обоснованно), приводит к значительным и непредсказуемым ошибкам. Хотя бихроматическая пирометрия не приводит к фатальным ошибкам в исследовании углеродных материалов, являющихся достаточно «серыми» излучателями, для карбидных и нитридных материалов ошибка при температурах, близких к температурам плавления

Альтернативным методом для определения температуры является полихроматическая (или мультиканальная) пирометрия, которая была использована авторами настоящего исследования для исследования фазовых диаграмм UHTC карбидов [9] и плавления тугоплавких оксидных керамик [10]. Важно отметить здесь, что с помощью полихроматической пирометрии истинная температура и коэффициент излучения одновременно определяются в широком диапазоне длин волн от 450 до 900 нм. Это позволяет надежно экстраполировать значение в область около 1000 нм, что соответствует длинам волн современных высокоэнергетических лазерных дисков и волоконных лазеров, и, таким образом, позволяет контролировать изменение поглощения материала на длине волны лазера, что является важным для корректной интерпретации результатов измерений.

Очевидно, что основным процессом деградации тугоплавких карбидов при высоких температурах в окислительной среде является образование оксидной пленки на поверхности, толщина и структура которой определяются многими факторами. Среди них: температура, длительность и режим нагрева, структура и стехиометрия конкретного карбидного образца. В случае карбида циркония, который является предметом



ния этих веществ, может достигать сотен единиц кельвинов.

Альтернативным методом определения температуры является полихроматическая (многоканальная) пирометрия, использованная авторами для исследования фазовых диаграмм сверхтугоплавких карбидов [9] и плавления тугоплавких оксидных керамик [10]. Здесь важно отметить, что с помощью полихроматической пирометрии одновременно определяется истинная температура и излучательная способность в широком диапазоне длин волн, примерно от 450 до 900 нм. Последнее позволяет надежно экстраполировать ее значение в область около 1000 нм, что соответствует длинам волн современных мощных дисковых и волоконных лазеров «технологического класса» и, таким образом, отслеживать изменение поглотительной способности материала на лазерной длине волны, что важно для правильной интерпретации результатов измерений.

Очевидно, что основным процессом деградации твердых высокотемпературных карбидов при высоких температурах в окислительной среде является образование слоя окисла на поверхности, толщина и структура которого определяется многими факторами. Среди них: температура, длительность нагрева, особенности динамики нагрева, структура и стехиометрия исходного карбида. Говоря о карбидах, в частности о карбиде циркония, которому посвящена настоящая работа, необходимо отметить, что процессу окисления – образованию окиси циркония на поверхности карбида циркония – посвящено большое число работ (см. [11]). Как правило, они выполнены в «идеальных», хорошо контролируемых условиях окисления: образец размещен в камере, в которой поддерживается определенная температура и газовая среда с заданным парциальным давлением кислорода. После образования оксида на поверхности образца из ZrC проводится подробный анализ зоны химического превращения с помощью различных аналитических методов. Здесь особое внимание необходимо уделить недавней работе [12], выполненной с использованием такой методологии. Температура в таких экспериментах обычно не превышает 1500 К (то есть лишь на несколько сотен градусов превосходит температуру начала активного окисления ZrC), а время процесса составляет от десятков минут до часов. Толщина оксидной пленки при этом превышает сотни микрон. Такие эксперименты позволяют довольно глубоко изучить кинетику окисления и некоторые элементарные процессы,

of this work, it should be noted that a large number of works have been devoted to the oxidation process, i. e., the formation of zirconium oxide scale on the surface of zirconium carbide (see [11]). As a rule, they are performed under “ideal”, well-controlled oxidation conditions: the sample is placed in a chamber in which a certain temperature and a gas mixture with a given oxygen partial pressure are maintained. After the formation of oxide scale on the surface of the ZrC sample, a detailed analysis of the zone of chemical reaction is carried out using various analytical methods. Here, special attention should be paid to the recent work [12], carried out using the above methodology. The temperature in such experiments usually does not exceed 1500 K (i. e., being only a few hundred degrees higher than the temperature at which active oxidation of ZrC begins), and the duration of the oxidation ranges from tens of minutes to hours. The thickness of the oxide scale in this case exceeds hundreds of microns. With this kind of experiments one can perform rather deep study of the kinetics of oxidation and study some basic processes occurring near the carbide-oxide interface. However, the possibility of their application to predicting the behavior of zirconium carbide under high-energy fluxes in an oxidizing environment needs additional confirmation.

Thus, the purpose of the present work was to study the behavior of zirconium carbide of various compositions within the homogeneity domain (solid solution) under exposure of laser radiation in an oxidizing medium (air). In this case, the experiments were carried out with the different duration of heating, while the maximum heating temperature remained constant.

## METHOD AND APPARATUS

The scheme of the experimental setup is shown in Fig. 1. A sample of zirconium carbide with a diameter of about 5 mm and a thickness of 1.5 mm, manufactured as described below, was in an air flow directed perpendicular to the surface at a speed of about 1 m/s for elimination of the influence of the natural convection on the oxide formation on the sample surface. Heating was carried out using a disk laser; in this case, three heating regimes were used with the different durations and the corresponding temperature excursions (Fig. 2).

The exact duration of the individual laser shots was limited by the time for reaching a temperature of 2530 K, which was controlled with a brightness pyrometer. The sighting spot of the pyrometers was about 0.3 mm. This ensured that the temperature

протекающие вблизи границы карбид-оксид. Однако возможность их применения к прогнозированию поведению карбида циркония при воздействии высокоэнергетического потока в окислительной среде нуждается в дополнительном подтверждении.

Таким образом, целью настоящей работы явилось изучение особенностей поведения карбида циркония различного состава из области гомогенности (твердого раствора) при воздействии лазерного излучения в окислительной среде (воздух). При этом эксперименты проводились с разной длительностью нагрева, а максимальная температура нагрева оставалась постоянной.

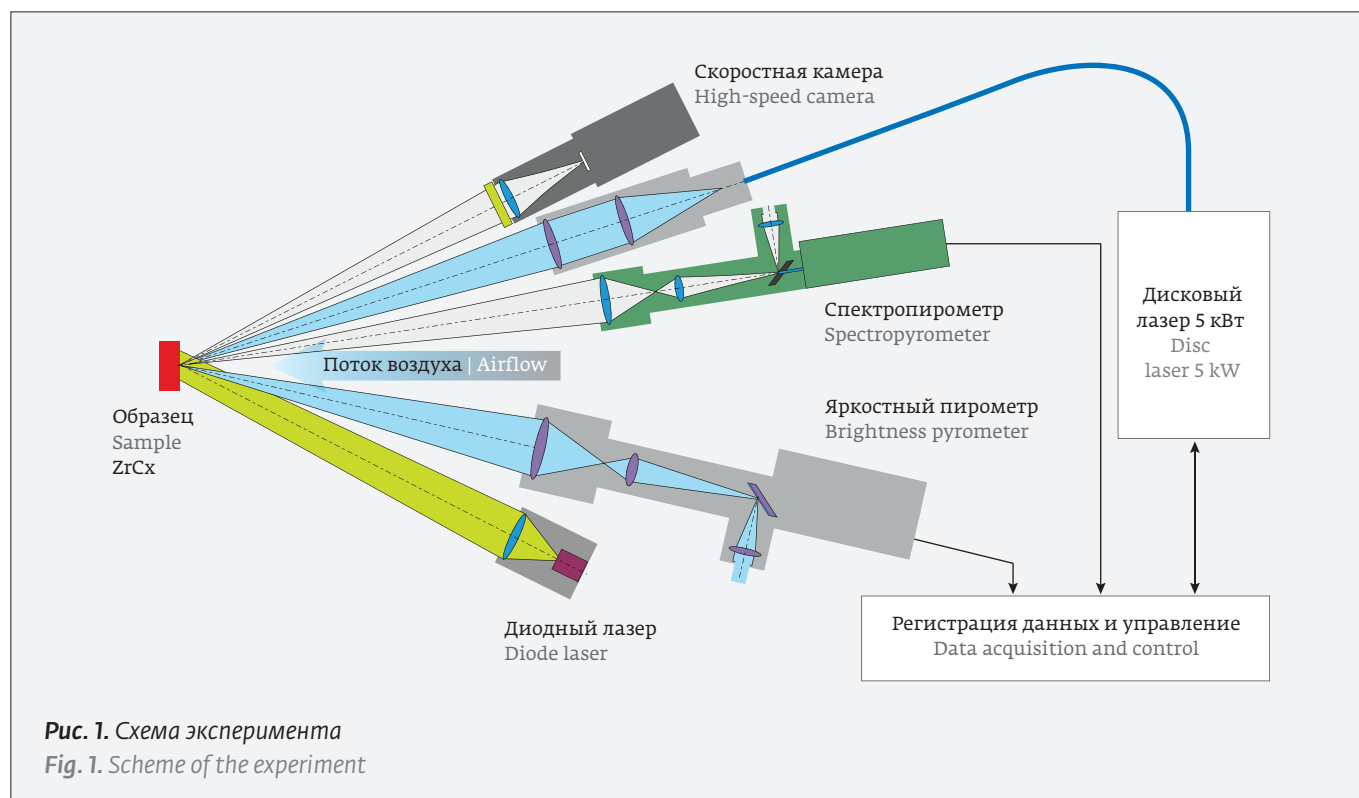
### МЕТОД И АППАРАТУРА

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Образец из карбида циркония диаметром около 5 мм и толщиной 1,5 мм, изготовленный по технологии, описанной ниже, находился в потоке воздуха, направленном перпендикулярно поверхности со скоростью около 1 м/с для исключения влияния свободной конвекции на картину формирования оксида на поверхности образца. Нагрев осуществлялся с помощью дискового лазера, при этом использовались три режима нагрева с различной скоростью нарастания температуры и соответственно длительностью (рис. 2).

was measured at the center of the isothermal zone of the sample. The brightness pyrometer measured the brightness temperature starting from about 1200 K, while the spectropyrometer, operating in the spectral range 400–900 nm with a time constant of 1.5 ms, measured the true temperature starting from 2000 K. Both the pyrometers were specially designed for experiments with laser heating and adapted to the given heating rates and the expected temperature ranges.

The spectropyrometer was calibrated up to a temperature of 3300 K using a high-temperature black body model, which temperature was measured by a CHINO IR-RST 65H reference pyrometer. The basic principles of the true temperature evaluation and spectral emissivity using the spectropyrometer are described in [11, 13].

During the experiment the processes on the surface were controlled with the high-speed video camera at frequency of 2000 frames per second at a spatial resolution of about 900×900 pixels. Due to the fact that the intensity of the sample's self-radiation during heating varied by several orders of magnitude, the use of video recording of the surface in the self-radiation was inappropriate. Therefore, the sample surface was uniformly illuminated by the radiation of a diode laser at a wavelength of 808 nm, and an appropriate filter was installed in front of the camera, which enabled video recording in reflected light with almost



Точное время эксперимента в каждом отдельном «выстреле» определялась временем достижения температуры 2530 К, контролируемой яркостным пирометром. Пятно визирования пирометров составляло около 0,3 мм. Таким образом, измерялась температура изотермической зоны в центре образца. Яркостный пирометр позволял измерять яркостную температуру, начиная примерно с 1200 К, тогда как спектропирометр, работающий в спектральном диапазоне 400–900 нм с постоянной времени 1,5 мс, позволял уверенно измерять истинную температуру начиная с 2000 К. Оба пирометра были специально разработаны для экспериментов с лазерным нагревом и дополнительно адаптированы к данным темпам нагрева и температурному диапазону.

Калибровка спектропирометра осуществлялась до температуры 3300 К с использованием высокотемпературной модели черного тела, истинная температура которой измерялась прецизионным пирометром CHINO IR-RST 65H. Основные принципы измерения истинной температуры и спектральной излучательной способности с помощью спектропирометра изложены в [11, 13].

Контроль за процессами на поверхности, происходящими в ходе эксперимента, осуществлялся с помощью высокоскоростной видеокамеры с частотой 2000 кадров в секунду при пространственном разрешении около 900×900 пикселей. В связи с тем, что интенсивность собственного излучения в процессе нагрева изменялась на несколько порядков, применение видеорегистрации поверхности в собственном изучении было нецелесообразным. Поэтому поверхность образца равномерно освещалась излучением диодного лазера на длине волны 808 нм, а перед камерой был установлен соответствующий фильтр, что позволяло осуществлять видеосъемку в отраженном свете при полном блокировании собственного излучения поверхности вплоть до максимальной температуры. Отраженное излучение лазера на длине волны 808 нм существенно превышает фон теплового излучения, уверенно регистрировалось спектропирометром (см. характерный спектр на рис. 3). Регистрируемый таким образом отраженный сигнал хотя и не прямо связан с направленно-полусферической отражательной способностью в связи с изменением углового распределения отраженного излучения в ходе эксперимента, однако позволяет получить дополнительную качественную информацию о процессах, протекающих на нагреваемой поверхности.

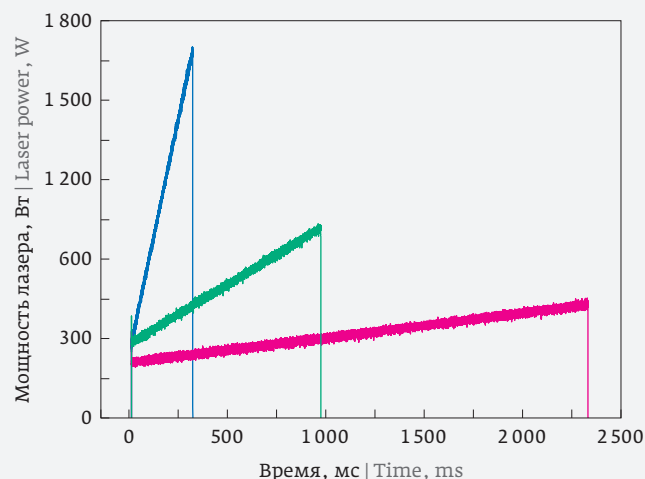


Рис. 2. Различные режимы нагрева

Fig. 2. Various heating regimes

complete blocking of the surface's own radiation up to the maximum temperature. Reflected diode-laser radiation at a wavelength of 808 nm, which significantly exceeded the background of thermal radiation, was reliably recorded by a spectropyrrometer (see the characteristic spectrum in Fig. 3). The reflected signal recorded in this way, helped to obtain additional qualitative information about the processes occurring

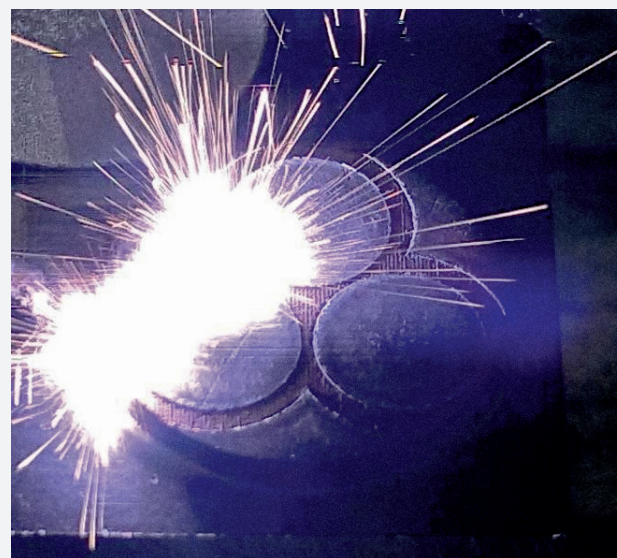


Рис. 3. Лазерно-эрозионная обработка образца карбида циркония

Fig. 3. Laser-erosion processing of a zirconium carbide sample



## ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО КАРБИДА ЦИРКОНИЯ

В связи с тем, что карбид циркония  $ZrC_x$  ( $x < 1$ ) представляет собой вещество с широкой областью гомогенности с вакансиями в неметаллической подрешетке, представляется интересным исследовать процесс высокоэнергетического воздействия на этот карбид с разными параметрами стехиометрии  $x$ . Для этого были изготовлены образцы трех составов со значениями  $x = 0,98$ ,  $0,9$  и  $0,77$ . Среди особых требований, предъявляемых к образцам: отсутствие значительного количества примесей в материале, его гомогенность, низкая пористость. Исходный порошок карбида циркония получался по методу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Данная технология была выбрана из-за возможности получения более чистых образцов по сравнению с методами карбо-термического восстановления оксидов и другими методами. Для синтеза карбида циркония навески порошков циркония (марка ПЦРК-1) и ацетиленовой сажи смешивались в шаровой мельнице, после чего в полученную смесь вводилась временная технологическая связка – цетан. Из полученной смеси прессовались цилиндрические заготовки для синтеза. Затем временная технологическая связка удалялась при нагреве в высокотемпературной вакуумной печи. Далее печь заполнялась аргоном, и температура повышалась до  $1673\text{ K}$  для осуществления реакции синтеза карбида.

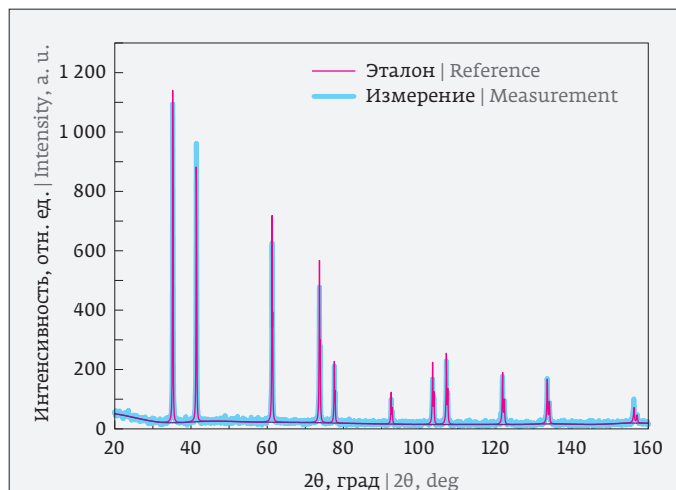
Для получения образцов с низкой пористостью синтезированный карбид циркония диспергировался в планетарной мельнице. Измельченный порошок после отмывки от материала мелющих тел спекался в установке горячего прессования с индукционным нагревом при температуре  $2130\text{ K}$  и давлении  $60\text{ МПа}$ . Толщина спеченных образцов составляла обычно около  $2\text{ мм}$  при диаметре около  $12\text{ мм}$ , что определялось внутренним диаметром графитовой пресс-формы горячего пресса. Спеченный образец обрабатывался на шлифовальном станке для удаления графита и уменьшения толщины образца до  $1,5\text{ мм}$ . Затем образец карбида циркония подвергался лазерно-эрозионной обработке для получения из него 3-х уменьшенных образцов диаметром  $5\text{ мм}$  (рис. 3), после чего эти образцы повторно шлифовались. В результате получались три образца карбида циркония диаметром  $5\text{ мм}$  и толщиной  $1,5\text{ мм}$  с одинаковыми характеристиками (плотность, состав), необходимые для проведения серий испытаний в разных режимах нагрева.

on the heated surface, although this signal was not directly related to the directional hemispherical reflectivity due to the change in the angular distribution of the reflected radiation during the experiment.

## PREPARATION OF SAMPLES OF NON-STOICHIOMETRIC ZIRCONIUM CARBIDE

Due to the fact that zirconium carbide  $ZrC_x$  ( $x < 1$ ) is a substance with a wide homogeneity domain with vacancies in the non-metallic sublattice, it seems interesting to study the process of high-energy impact on this carbide with different stoichiometry parameters  $x$ . For this purpose, samples of three compositions with  $x = 0.98$ ,  $0.9$ , and  $0.77$  were prepared having insignificant amount of impurities in the material, high homogeneity and low porosity. The initial powder of zirconium carbide was obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS). This technology was chosen due to the possibility of obtaining cleaner samples compared to the methods of carbothermal reduction of oxides and some others. For the synthesis of zirconium carbide, weighed portions of zirconium powders (PTsRK-1 grade) and acetylene soot were mixed in a ball mill, after which a temporary technological binder, cetane, was introduced into the resulting mixture. Cylindrical green pellets for synthesis were pressed from the resulting mixture. Then the temporary technological bond was removed by heating in a high-temperature vacuum furnace. Next, the furnace was filled with argon, and the temperature was raised to  $1673\text{ K}$  to carry out the carbide synthesis reaction.

To obtain samples with low porosity, the synthesized zirconium carbide was dispersed in a planetary mill. The crushed powder after washing away from the grinding media material was sintered in a hot pressing unit with induction heating at a temperature of  $2130\text{ K}$  and a pressure of  $60\text{ МПа}$ . The thickness of the sintered specimens was typically about  $2\text{ мм}$  with a diameter of about  $12\text{ мм}$ , which was determined by the internal diameter of the hot press graphite mold. The sintered sample is processed on a grinding machine to remove graphite and reduce the thickness of the sample to  $1.5\text{ мм}$ . Then the zirconium carbide sample was subjected to laser-erosion treatment to cut it to three reduced samples with a diameter of  $5\text{ мм}$  (Fig. 3), after which these samples were re-ground. As a result, three samples of zirconium carbide with a diameter of  $5\text{ мм}$  and a thickness of  $1.5\text{ мм}$  were obtained having the same characteristics (density, composition) necessary for conducting a series of tests in different heating regimes.

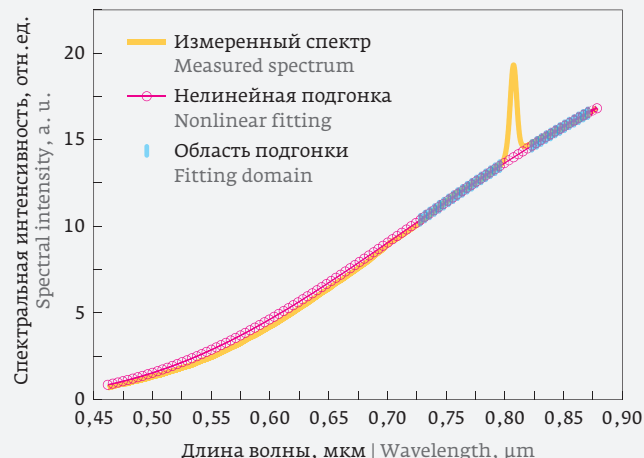


**Рис. 4.** Дифрактограмма образца из  $ZrC_{0,98}$   
**Fig. 4.** Diffraction pattern of a sample from  $ZrC_{0,98}$

Содержание углерода в образцах карбида циркония определялось методом динамической вспышки на элементном анализаторе Combustion Master CS (NCS, Германия); содержание кислорода и азота – методом восстановительного плавления на элементном анализаторе Fusion Master ON (NCS, Германия). Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов карбида циркония проводился на дифрактометре SmartLab SE (Rigaku, Япония) с использованием  $Cu\ K\alpha$ -излучения. На дифрактограммах (рис. 4) присутствуют только рефлексы, соответствующие фазе карбида циркония. Общие характеристики образцов представлены в табл. 1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на образцах карбида циркония трех различных составов:  $ZrC_{0,77}$ ,  $ZrC_{0,9}$ ,  $ZrC_{0,98}$ . Образец диаметром 5 мм устанавливался в графитовый держатель. Поверхность образца обдувалась слабым потоком воздуха. Излучение мощного дискового и диодного лазера фокусировалось на поверхность исследуемого образца, причем диаметры пятен фокусировки были близки к диаметру образца. Эксперименты с образцами каждого состава проводились с различными темпами нагрева, показанными на рис. 2. При этом темп роста температуры на поверхности составлял соответственно 700–1000 К/с, 2000–3800 К/с и 8500–12000 К/с. Путем аппроксимации спектров теплового



**Рис. 5.** Характерный спектр излучения поверхности  $ZrC_{0,98}+ZrO_2$ . Отражение диодного лазера (808 нм) – пик на соответствующей длине волны – дает важную информацию о состоянии поверхности  
**Fig. 5.** Characteristic radiation spectrum of the  $ZrC_{0,98}+ZrO_2$  surface. Reflection of a diode laser (808 nm) – a peak at the corresponding wavelength – provides important information about the state of the surface

The carbon content in zirconium carbide samples was determined by the dynamic flash method with a Combustion elemental analyzer Master CS (NCS, Germany); the content of oxygen and nitrogen with the method of reduction-melting in the elemental analyzer Fusion Master ON (NCS, Germany). XRD phase analyses of zirconium carbide samples was carried out with a diffractometer SmartLab SE (Rigaku, Japan) using  $Cu\ K\alpha$  radiation. The diffraction patterns (Fig. 4) contain only reflections corresponding to the zirconium carbide phase. General characteristics of the samples are presented in Table 1.

### EXPERIMENTAL RESULTS

The experiments were carried out on samples of zirconium carbide of three different compositions:  $ZrC_{0,77}$ ,  $ZrC_{0,9}$ ,  $ZrC_{0,98}$ . A sample of 5 mm in diam-

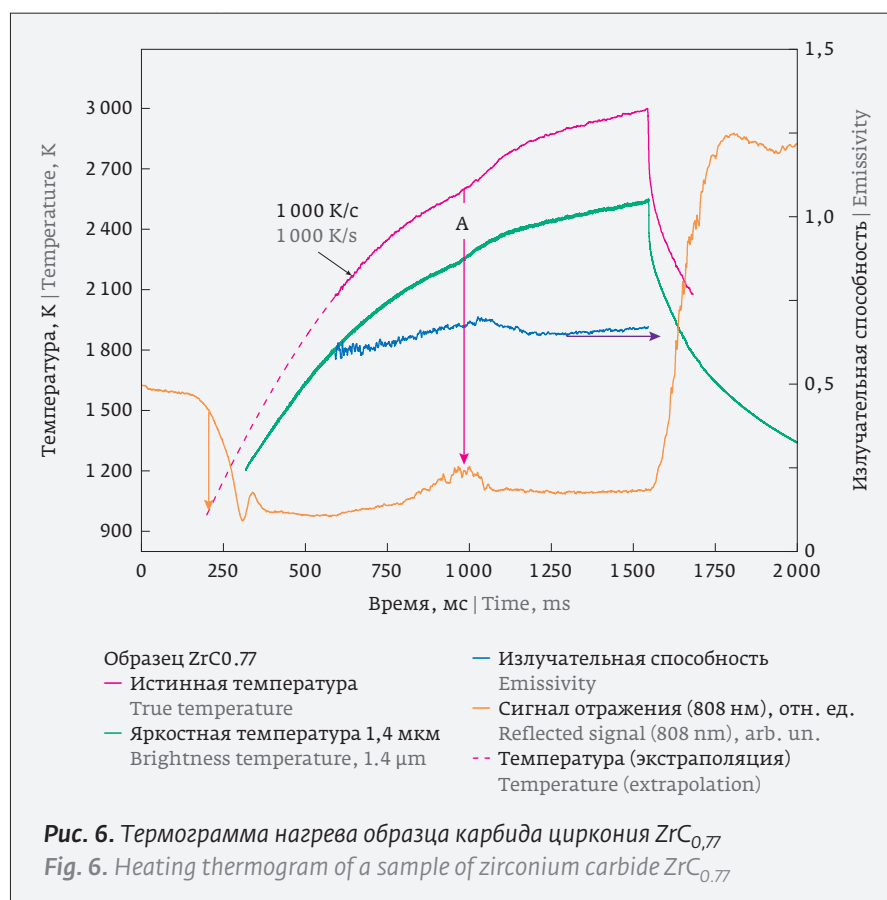
**Таблица.** Характеристики образцов карбида циркония  
**Table.** Characteristics of zirconium carbide samples

	C, масс %	O, масс %	N, масс %	C/Zr	a, Å	Пористость, %
$ZrC_{0,98}$	11,30	0,49	0,19	0,98	4,687	10,11
$ZrC_{0,9}$	10,52	1,05	0,05	0,90	4,691	5,55
$ZrC_{0,77}$	8,97	2,15	0,09	0,77	4,679	9,81



излучения поверхности образца (рис. 5) произведением функции Планка и излучательной способности рассчитывались значения истинной температуры поверхности и спектральной излучательной способности в предположении, что в относительно узком диапазоне длин волн излучательная способность не зависит от длины волны (приближение серого тела). Аппроксимация осуществлялась в двух диапазонах длин волн (730–790 нм и 820–870 нм), чтобы исключить из рассмотрения влияние излучения диодного лазера. С учетом того, что, как будет показано ниже, значительный слой оксида циркония уже образуется на поверхности к моменту достижения нижнего температурного предела для спектропиromетра (а это примерно 2000 К), приближение серого тела для оксида циркония выглядит достаточно адекватно [14].

На рис. 6 показаны результаты типичного эксперимента с длительностью нагрева около 1,5 с для образца с минимальным содержанием углерода. Спектральная излучательная способность в диапазоне длин волн, используемых для нелинейной подгонки (730–870 нм) в области температур, регистрируемых спектропиromетром, лежит в диапазоне около 0,6–0,75. Это достаточно хорошо соответствует измерениям, выполненным в [16] в условиях лазерного нагрева массивного образца из двуокиси циркония, стабилизированной окисью иттрия. На начальном этапе нагрева отмечается резкое снижение отражения поверхностью образца, которое начинается при температуре в окрестности 1000 К. Указанная температура, согласно [12, 13], находится в хорошем соответствии с температурой, при которой начинается активное окисление карбида циркония. Отражательная способность двуокиси циркония при этой температуре является весьма высокой [17] и сравнима с отражательной способностью карбида циркония. Несмотря на это, тонкая пленка оксида, возникающая на поверхности, скорее всего представляет собой субстехиометрический оксид, который имеет весьма низкую



**Рис. 6.** Термограмма нагрева образца карбида циркония  $ZrC_{0,77}$   
**Fig. 6.** Heating thermogram of a sample of zirconium carbide  $ZrC_{0,77}$

eter was placed in a graphite holder. The sample surface was blown with a weak air flow. Radiation from the high-power disk laser and the diode laser was focused onto the surface of the sample, with the diameters of the focusing spots being close to the diameter of the sample. Experiments with samples of each composition were carried out with different heating rates shown in Fig. 2. In this case, the temperature increase rate on the surface was 700–1000 K/s, 2000–3800 K/s, and 8500–12000 K/s, respectively. By approximating the thermal emission spectra of the sample surface (Fig. 5) by the product of the Planck function and emissivity, the values of the true surface temperature and spectral emissivity were calculated under the assumption that in a relatively narrow wavelength range, the emissivity does not depend on the wavelength (graybody approximation). The approximation was carried out in two wavelength ranges (730–790 nm and 820–870 nm) in order to exclude from consideration the effect of diode laser radiation. Taking into account the fact that, as will be shown below, a significant layer of zirconium oxide is already formed on the surface by the time the lower temperature limit for the spectropirometer is reached (which is approximately

отражательную способность. Регистрация процесса нагрева с помощью скоростной видеокамеры также подтверждает резкое потемнение поверхности, облучаемой лазером. Вблизи момента времени А (см. рис. 6) излучательная способность и сигнал отражения демонстрируют особенность, которая хорошо видна на термограмме нагрева. Соответствующая ей температура, около 2600 К, близка к известному переходу диоксида циркония из моноклинной фазы в кубическую.

Такое поведение образцов из  $ZrC_x$  качественно наблюдалось для всех трех исходных стехиометрических составов и проявлялось в экспериментах, выполненных с различными скоростями нагрева. При нагреве с более низкой скоростью и, следовательно, с более медленным темпом изменения температуры толщина слоя двуоксида циркония была максимальной – порядка 20 мкм. При нагреве со средней скоростью (см. рис. 2) толщина слоя была около 10 мкм, и при самом быстром нагреве – около 5 мкм.

После проведения эксперимента образцы исследовались различными методами. На рис. 7 приведена рентгеновская дифрактограмма поверхности образца после эксперимента, снятая с помощью дифрактометра SmartLab SE. Оказалось, что образованное на поверхности покрытие белого цвета соответствует моноклинному  $ZrO_2$ .

Спектры рамановского рассеяния модифицированной поверхности исходных карбидных образцов были получены с помощью рамановского микроскопа M532, обладающего высоким пространственным и спектральным разрешением. На рис. 8 показан рамановский спектр окисной пленки, образовавшейся на поверхности карбида циркония, в сравнении с высокочистым порошком двуоксида циркония. Полученные спектры комбинационного рассеяния не зависели от исходного стехиометрического состава образцов из карбида циркония и хорошо соответствовали порошку из чистого  $ZrO_2$ . Полученный спектр комбинационного рассеяния соответствовал моноклинной фазе  $ZrO_2$  в соответствии с данными [18].

Таким образом, оказалось, что в диоксиде циркония, образовавшемся на поверхности карбида циркония при интенсивном лазерном нагреве, обнаружена только моноклинная фаза, хотя в работе [13], наряду с моноклинной фазой, были обнаружены как тетрагональная, так и кубическая фаза. Выяснение этого вопроса предполагается осуществить в ходе дальнейших исследований.

Для определения толщины и структуры области термохимического преобразования поверхности

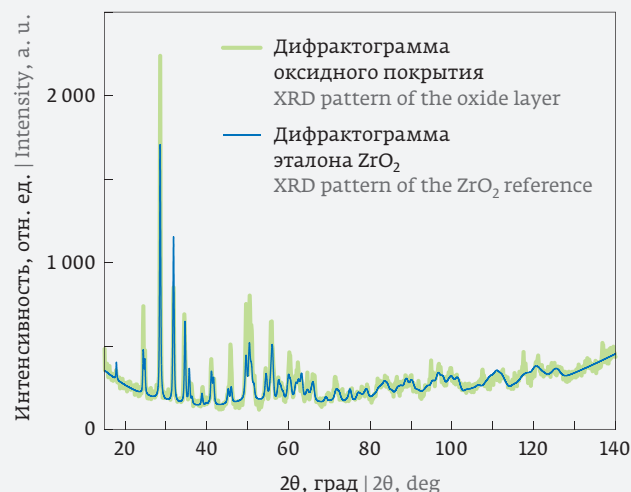


Рис. 7. Рентгенограмма поверхности образцов после лазерного нагрева

Fig. 7. XRD pattern of the sample surface after laser heating

2000 К), the gray body approximation for zirconium oxide looks quite adequate [14].

Fig. 6 shows the results of a typical experiment with a heating time of about 1.5 s for a sample with a minimum carbon content. The spectral emissivity in the wavelength range used for the non-linear fitting (730–870 nm) in the temperature range recorded by the spectropyrrometer lies in the range of about 0.6–0.75. This is in a good agreement with the measurements

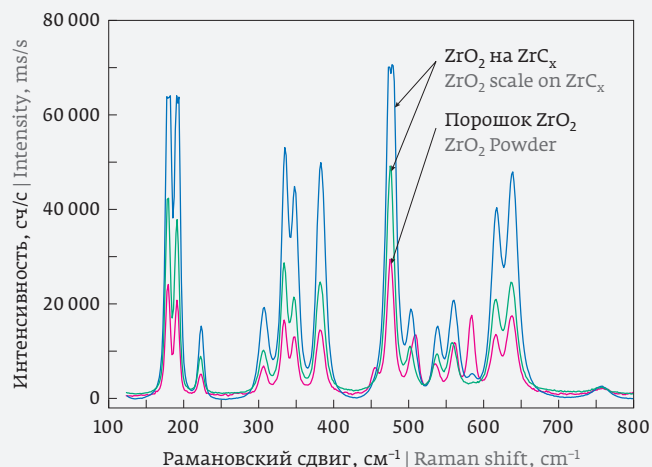
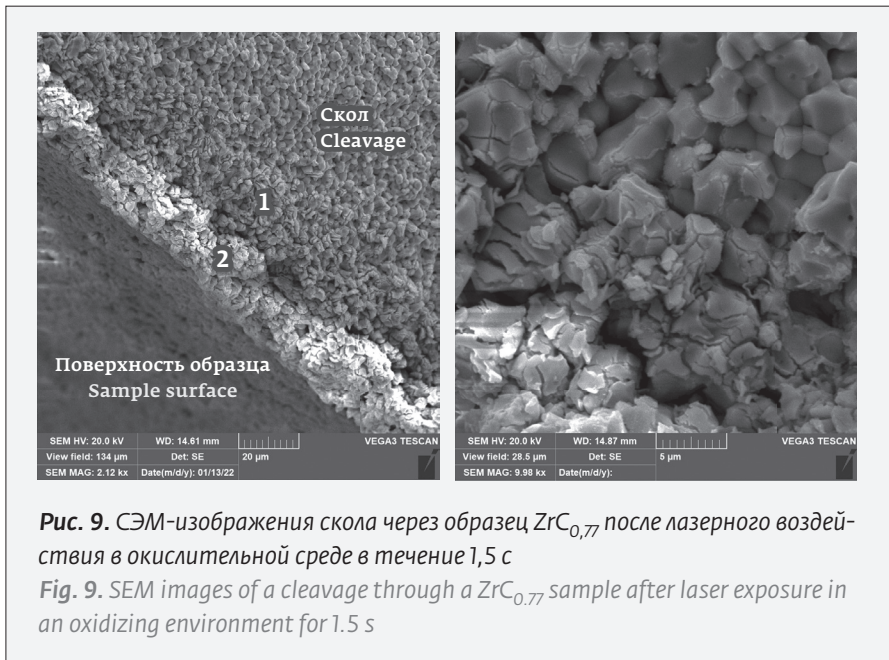


Рис. 8. Спектры комбинационного (рамановского) рассеяния поверхности образцов из  $ZrC_x$

Fig. 8. Raman spectra of the surface of  $ZrC_x$  samples

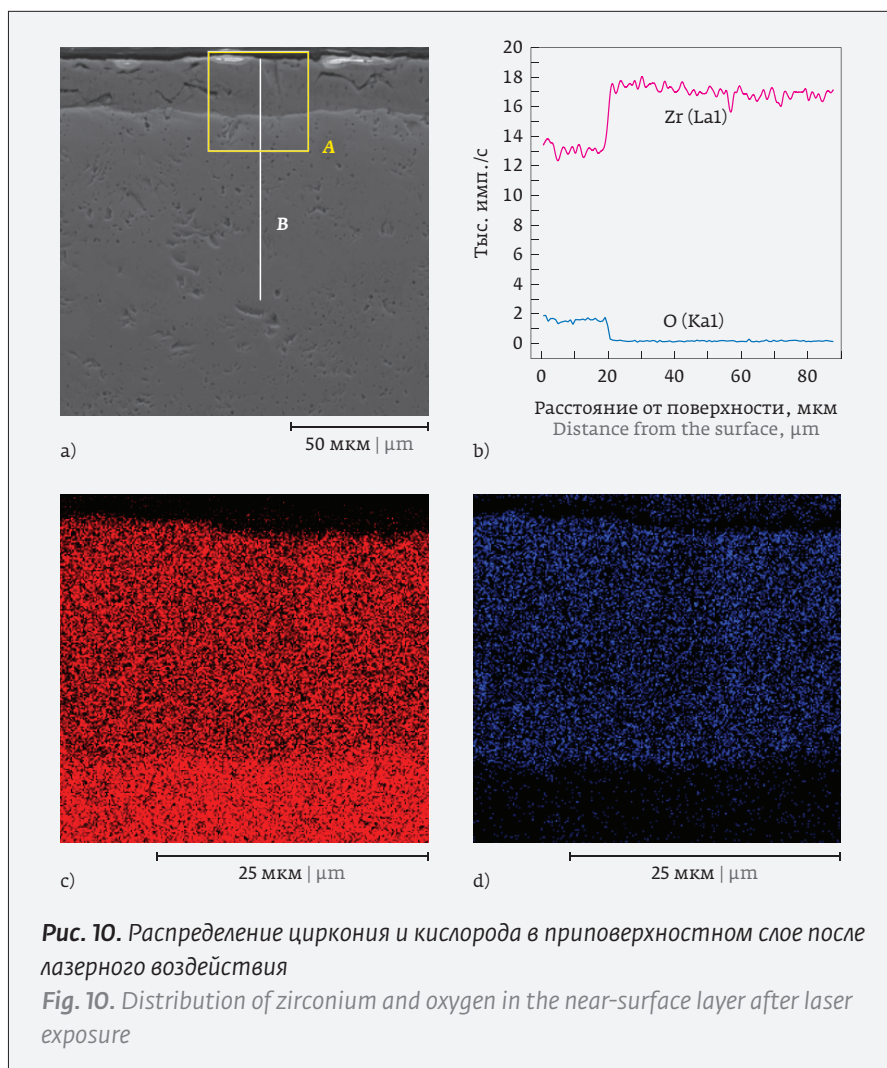


**Рис. 9.** СЭМ-изображения скола через образец  $ZrC_{0,77}$  после лазерного воздействия в окислительной среде в течение 1,5 с  
**Fig. 9.** SEM images of a cleavage through a  $ZrC_{0,77}$  sample after laser exposure in an oxidizing environment for 1.5 s

performed in [16] under conditions of laser heating of a bulk sample of with the yttria stabilized zirconium dioxide. At the initial stage of heating, a sharp decrease in reflection by the sample surface is observed, which begins at a temperature in the vicinity of 1000 K. According to [12, 13], this temperature is in a good agreement with the temperature at which an active oxidation of zirconium carbide begins. The reflectivity of zirconia at this temperature is very high [17] and is comparable to the reflectivity of zirconium carbide. Despite this, the thin oxide scale that appears on the surface is most likely a substoichiometric oxide, which has a very low reflectivity.

карбида циркония в диоксид циркония был выполнен СЭМ-анализ зоны поверхности, подвергнутой нагреву. На рис. 9 показано СЭМ-изображение скола, перпендикулярного поверхности образца. На левом снимке цветными линиями показаны различные зоны: поверхность образца; зона скола – исходный материал образца  $ZrC_{0,77}$ ; 1 – переходная зона карбидного материала; 2 – образовавшийся оксид. Справа – зоны 1 и 2 при большем увеличении.

Распределение элементов в окрестности зоны окисления изучено с помощью СЭМ-ЭДС анализа шлифа, выполненного перпендикулярно поверхности образца. Результаты такого анализа представлены на рис. 10. Оказалось, что окисленная область имеет весьма четкую границу раздела с исходным карбидом. На рисунке 10а показан шлиф, сделанный перпендикулярно поверхности образца с указанием области элементного ЭДС-картирования – А и направления сканирования



**Рис. 10.** Распределение циркония и кислорода в приповерхностном слое после лазерного воздействия  
**Fig. 10.** Distribution of zirconium and oxygen in the near-surface layer after laser exposure

распределения элементов – В. Из рис. 10b и 10d следует, что распределение кислорода в приповерхностном слое толщиной около 20 мкм весьма однородно. Ему соответствует меньшая по сравнению с исходным образцом плотность циркония в этом слое (см. рис. 10b и 10c). В целом распределение как циркония, так и кислорода весьма однородно как в исходной зоне карбида, так и в окисле. Во всех режимах лазерного воздействия и для всех рассмотренных составов образцов отмечается плотное прилегание оксидного слоя к исходному карбиду. Таким образом, возможно, что образующийся оксидный слой будет эффективно препятствовать окислительной деградации карбида циркония при определенных режимах нагрева.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00115.

### REFERENCES

1. Wuchina E., Opila E., Opeka M., Fahrenholtz B., Talmy I. UHTC: ultra-high temperature ceramic materials for extreme environment applications. *The Electrochemical Society Interface*. 2007; 16(4): 30–36. DOI:10.1149/2.F04074IF.
2. Zeng Y., Wang D., Xiong X., Zhang X., Withers P. J., Sun W. et al. Ablation-resistant carbide  $Zr_{0.8}Ti_{0.2}Co_{0.74}B_{0.26}$  for oxidizing environments up to 3000 °C.

Registration of the heating process using a high-speed video camera also confirms the sharp darkening of the surface irradiated by the laser. Near time point A (see Fig. 6), the emissivity and reflection signal show a feature that is clearly visible in the heating thermogram. The temperature corresponding to it, about 2600 K, is close to the well-known transition of zirconium dioxide from the monoclinic phase to the cubic one.

This behavior of  $ZrC_x$  samples was qualitatively observed for all three initial stoichiometric compositions and manifested itself in experiments performed with different heating rates. During heating at a lower rate and, consequently, with a slower rate of temperature increase, the thickness of the zirconium dioxide scale reached the maximum value of about 20  $\mu\text{m}$ . During heating at a medium rate (see Fig. 2), the scale thickness was about 10  $\mu\text{m}$ , and during the fastest heating, about 5  $\mu\text{m}$ .

After the experiment, the samples were studied by various methods. Figure 7 shows the X-ray diffraction pattern of the sample surface after the experiment, taken with a diffractometer SmartLab SE. It turned out that the white scale formed on the surface corresponds to the monoclinic  $ZrO_2$ .



**ООО «Лазерные компоненты» – российский поставщик комплектующих к оптоэлектронному, лазерному и тепловизионному оборудованию, а также готовых решений для построения комплексных систем безопасности.**

#### ЛАЗЕРЫ:

- ▶ Диодные лазеры для накачки
- ▶ DPSS лазеры
- ▶ Сверхбыстрые лазеры
- ▶ MOPA лазеры



#### ИНФРАКРАСНАЯ ТЕХНИКА:

- ▶ Камеры SWIR, MWIR, LWIR, UV
- ▶ ИК объективы
- ▶ Микродисплеи AMOLED



#### КОМПЛЕКТУЮЩИЕ К ЛАЗЕРАМ:

- ▶ Активные элементы
- ▶ Лампы накачки
- ▶ Квантроны
- ▶ Ячейки Поккельса и т.д.



#### ОПТИКА НА ЗАКАЗ И ПО КАТАЛОГАМ:

- ▶ Призмы
- ▶ Оптические окна, клинья
- ▶ Узкополосные фильтры
- ▶ Дифракционные решетки
- ▶ Сферические, асферические линзы



#### НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ:

- ▶ Инклинометры
- ▶ Инерциальные измерительные блоки
- ▶ Электронные компасы
- ▶ Волоконно-оптические гироскопы
- ▶ Интегрированные навигационные системы и т. д.



Россия, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 1, стр. 17  
 sales@lasercomponents.ru  
 www.lasercomponents.ru  
 +7 (495) 845-12-10



- Nature Communications*. 2017; 8(1): 15836. DOI:10.1038/ncomms15836.
- Eremin S. A., Anikin V. N., Sinitsyn D. Yu., Gus'kov V. N., Yudin A. G. Investigation of the process of formation of hafnium carbide on carbon-carbon composite material in the system  $\text{HfCl}_4\text{-CH}_4\text{-Ar}$ . *Refractories and Industrial Ceramics*. 2017; 58(2): 233–238. DOI:10.1007/s11148-017-0086-z
  - Gaballa O. G. Processing development of  $4\text{TaC-HfC}$  and related carbides and borides for extreme environments. [Doctor of Philosophy] [Ames]: Iowa State University, Digital Repository; 2012. DOI:10.31274/etd-180810-965.
  - Nieto A., Kumar A., Lahiri D., Zhang C., Seal S., Agarwal A. Oxidation behavior of graphene nanoplatelet reinforced tantalum carbide composites in high temperature plasma flow. *Carbon*. 2014; 67: 398–408. DOI:10.1016/j.carbon.2013.10.010.
  - Evdokimenko Ju., Frolov G., Kisel' V., Buchakov S., Grigor'ev O., Podchernjaeva I., Neshpor I., Cyganenko V. Thermoeruzion tests of Ultra-high-temperature ceramic coatings on carbon-carbon composite substrates. III international scientific-technical conference "INNOVATIONS". 2017; 216–219. Евдокименко Ю., Фролов Г., Кисель В., Бучаков С., Григорьев О., Подчерняева И., Нешпор И., Цыганенко В. Термоэрозийные испытания покрытий на основе ультравысокотемпературной керамики на подложках из композиционного углерод-углеродного материала. III Международный научный конгресс «Инновации». 2017; 216–219
  - Frolov A. M., Petukhov S. V., Faliakhov T. M., Sheindlin M. A. Mass-spectrometric analysis of laser induced evaporation of tantalum carbide up to 4900 K. *Vestnik Ob'edinennogo instituta vysokikh temperatur*. 2018; 1(1): 43–46. DOI:10.33849/2018110. Фролов А. М., Петухов С. В., Фалиахов Т. М., Шейндлин М. А. Масс-спектрометрический анализ лазерно-индуцированного испарения карбида тантала до 4900 К. Вестник Объединенного института высоких температур. 2018; 1(1): 43–46. DOI:10.33849/2018110.
  - Sheindlin M., Frolov A., Petukhov S., Bottomley D., Masaki K., Manara D. et al. Mass spectrometric study of the laser-evaporated Fe-Zr-O system up to 3300 K. *Journal of the American Ceramic Society*. 2022; 105(3): 2161–2170. DOI:10.1111/jace.18185
  - Jankowiak A., Justin J. F. Ultra high temperature ceramics for aerospace applications. *ODAS 2014*. 2014. www.hal.archives-ouvertes.fr/hal-01103216
  - Sheindlin M., Falyakhov T., Petukhov S., Valyano G., Vasin A. Recent advances in the study of high-temperature behaviour of non-stoichiometric  $\text{TaC}_x$ ,  $\text{HfC}_x$  and  $\text{ZrC}_x$  carbides in the domain of their congruent melting point. *Advances in Applied Ceramics*. 2018; 117(sup1): s48-s55. DOI:10.1080/17436753.2018.1510819.
  - Bgasheva T., Falyakhov T., Petukhov S., Sheindlin M., Vasin A., Vervikishko P. Laser-pulse melting of calcium oxide and some peculiarities of its high-temperature behavior. *Journal of the American Ceramic Society*. 2021; 104(7): 3461–3477. DOI:10.1111/jace.17676
  - Pierrat B. Oxidation of an ultra high temperature ceramic: zirconium carbide. [Master Thesis] Luleå University of Technology; 2010. www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1028975/FULLTEXT01.pdf
  - Gasparrini C., Podor R., Horlait D., Chater R., Lee W. E. Zirconium carbide oxidation: maltese cross formation and interface characterization. *Oxidation of Metals*. 2017; 88(3–4): 509–519. DOI:10.1007/s11085-016-9672-6.
  - Sheindlin M., Ronchi C., Heinz W. Recent advances in high-speed polychromatic pyrometry. *Proceedings of 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Science and Industry*; Budapest: IMEKO; 2004: 545–550.
  - Petrov V. A. Thermoradiation characteristics of refractory oxides upon heating by concentrated laser radiation. *High Temperature*. 2016; 54(2): 186–196. DOI:10.1134/S0018151X16020140. Петров В. А. Терморрадиационные характеристики тугоплавких оксидов при нагреве концентрированным лазерным излучением. *Теплофизика высоких температур*. 2016; 54(2): 197–209. DOI:10.7868/S0040364416020150.
  - Petrov V., Vorobyev A., Chernyshev A. Thermal radiation and optical properties of cubic zirconia stabilised with yttria up to the temperature of high rate evaporation. *High Temperatures-High Pressures*. 2002; 34(6): 657–668. DOI:10.1068/htjr077.
  - Latiev LN, Petrov VA, Chekhovskoy VY, Shestakov EN. Izluchatelnyye harakteristiki metallov (Radiative characteristics of metals). In: Sheindlin AE, editor. *Izluchatelnyye svoystva tvorodykh materialov (Radiative properties of solid materials)*. – Moscow: Energia, 1974: 438–445. Латыев Л. Н., Петров В. А., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Излучательные характеристики металлов. В: *Излучательные свойства*

Raman scattering spectra of the modified surface of the initial carbide samples were obtained using an M 532 Raman microscope. Fig. 8 shows the Raman spectrum of an oxide scale compared to high purity zirconia powder. The obtained Raman spectra did not depend on the initial stoichiometric composition of the zirconium carbide samples and were in a good agreement with a pure  $\text{ZrO}_2$  powder. The resulting Raman spectrum corresponded to the monoclinic phase of  $\text{ZrO}_2$  being in accordance with the data of [18].

Thus, it turned out that only the monoclinic phase was found in zirconium dioxide formed on the surface of zirconium carbide during intense laser heating, although in [13] both the tetragonal and cubic phases were found along with the monoclinic phase. This issue is expected to be clarified in the course of further research.

To determine the thickness and the structure of the region of thermochemical transformation of the surface of zirconium carbide into zirconium dioxide, the SEM analysis of the surface area subjected to heating was performed. Fig. 9 shows the SEM image of a cleavage perpendicular to the sample surface. In the left image, the colored lines show different zones: the surface of the sample; the cleavage zone is the initial  $\text{ZrC}_{0.77}$  sample; 1 – transition zone of carbide material; 2 – formed oxide. On the right, the zones 1 and 2 shown at higher magnification.

The distribution of elements in the vicinity of the oxidation zone was studied using SEM-EDS analysis of the thin section, made perpendicular to the sample surface. The results of the analysis are presented in Fig. 10. It turned out that the oxidized zone has a very clear interface with the original carbide. Fig. 10a shows a section made perpendicular to the sample surface with an indication of the area of elemental EDS mapping – A, and the direction of scanning the distribution of elements – B. From Fig. 10 b and 10 d, it follows that the distribution of oxygen in the near-surface layer with a thickness of about 20  $\mu\text{m}$  is very uniform. It corresponds to a lower density of zirconium in this layer compared to the original sample (see Fig. 10b and 10c). In general, the distribution of both zirconium and oxygen is very uniform both in the initial zone of the carbide and in the formed oxide scale. In all regimes of laser exposure and for all the compositions of the samples considered, a tight fit of the oxide layer to the initial carbide is noted. Thus, it is possible that the forming oxide layer will effectively prevent the oxidative degrada-



твёрдых материалов: справочник. Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 470 с.

18. **Bauer A. J.R.** ZrO<sub>2</sub> Phase identification with Raman Spectroscopy. *Raman-020 rev. A.* 2018. [www.tsi.com/getmedia/9834a4f0-278e-4fe4-8012-8723a3feld06/Identification\\_of\\_ZrO2\\_Phase\\_w\\_Raman\\_Spectroscopy\\_App\\_Note\\_RAMAN-020\\_US-web?ext=.pdf](http://www.tsi.com/getmedia/9834a4f0-278e-4fe4-8012-8723a3feld06/Identification_of_ZrO2_Phase_w_Raman_Spectroscopy_App_Note_RAMAN-020_US-web?ext=.pdf)

## ОБ АВТОРАХ

Шейндлин Михаил Александрович, д. ф.-м. н., зав. лаб., лаборатория экстремальных энергетических воздействий ОИВТ РАН, Москва, Россия.

E-mail: sheindlin@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4960-7757

Брыкин Михаил Владимирович, к. ф.-м. н., с. н. с., лаборатория экстремальных энергетических воздействий ОИВТ РАН, Москва, Россия.

E-mail: mbrykin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8046-888X

Бгашева Татьяна Владимировна, м. н. с., лаборатория экстремальных энергетических воздействий ОИВТ РАН, Москва, Россия.

ORCID: 0000-0002-5258-0153

Васин Андрей Андреевич, вед. инж., лаборатория экстремальных энергетических воздействий ОИВТ РАН, Москва, Россия. E-mail: av65536@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2384-7090

Вервикишко Павел Сергеевич, н. с., лаборатория экстремальных энергетических воздействий ОИВТ РАН, Москва, Россия. E-mail: pvervikishko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4527-6524

Петухов Сергей Владимирович, вед. инженер, лаборатория экстремальных энергетических воздействий ОИВТ РАН, Москва, Россия.

E-mail: petuhov.sergey@bk.ru

ORCID: 0000-0003-3852-1314

Фролов Александр Михайлович, н. с., лаборатория экстремальных энергетических воздействий ОИВТ РАН, Москва, Россия. E-mail: matotz@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3091-9451

tion of the dense zirconium carbide under a certain heating conditions.

## ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and Rosatom State Corporation within the framework of the scientific project No. 20-21-00115

## ABOUT AUTHORS

Sheindlin Mikhail Aleksandrovich, head of laboratory, laboratory for extreme energy impacts, JIHT RAS, Moscow, Russia.

ORCID: 0000-0002-4960-7757

Brykin Mikhaik Vladimirovich senior researcher, laboratory for extreme energy impacts, JIHT RAS, Moscow, Russia.

ORCID: 0000-0002-8046-888X

Bgasheva Tatiana Vladimirovna, junior researcher, laboratory for extreme energy impacts, JIHT RAS, Moscow, Russia.

ORCID: 0000-0002-5258-0153

Vasin Andrew Andreevich, leading engineer, laboratory for extreme energy impacts, JIHT RAS, Moscow, Russia.

ORCID: 0000-0002-2384-7090

Vervikishko Pavel Sergeevich, researcher, laboratory for extreme energy impacts, JIHT RAS, Moscow, Russia. E-mail: pvervikishko@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-4527-6524

Petukhov Sergei Vladimirovich, leading engineer, laboratory for extreme energy impacts, JIHT RAS, Moscow, Russia.

ORCID: 0000-0003-3852-1314

Frolov Aleksander Michailovich, researcher, laboratory for extreme energy impacts, JIHT RAS, Moscow, Russia. E-mail: matotz@gmail.com.

0000-0002-3091-9451

# КОНФЕРЕНЦИЯ

Т - Я МЕЖДУНАРОДНАЯ

ЛАЗЕРЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ  
И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ

23–27 мая 2022 г., Минск, Беларусь

Конференция является продолжением семинаров «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе», которые организовывались **Институтом физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси** на протяжении последних 20 лет. На конференции будут представлены обзорные и оригинальные научные сообщения, охватывающие широкий круг актуальных вопросов как по физике, технике и применению лазерных излучателей, включая **твёрдотельные лазеры с диодной накачкой, лазерные диоды, квантово-каскадные лазеры, лазеры с электронным и оптическим возбуждением, а также другие типы источников и приёмников оптического излучения**, так и по физике и технологии создания полупроводниковых материалов, гетероструктур и оптоэлектронных устройств на их основе.

**Конференция будет проводиться в очном режиме (Минск, Институт физики НАН Беларуси) с возможностью on-line участия с использованием платформы Zoom.**

Рабочие языки Конференции: русский и английский.

Заявки на участие в *LSES Minsk 2022* следует высылать на электронный адрес **u.malashenok@ifanbel.bas-net.by** Ульяны Малашенок (Минск) или **zina.sokolova@mail.ioffe.ru** Зинаиды Соколовой (Санкт-Петербург). В заявке указываются сведения о предпочитаемом типе доклада (**плeнарный, устный, стендовый доклад, доклад для круглого стола; доклад в очном режиме или на платформе ZOOM**), сведения о докладчике (**ФИО, служебный адрес, телефон, эл. почта**). К заявке прикладываются абстракт доклада (**150–200 слов максимум**) на русском или английском языке.