

Исследования эрозии и процессов старения высокотемпературных материалов под воздействием потока продуктов сгорания

Римгаудас Абрайтис,

Дарюс Абрайтис,

Эгидиус Блажявичюс,

Стасис Гоберис

*Kauno technologijos universiteto
Architektūros ir statybos institutas,
Tunelio g. 60, LT-44405 Kaunas
El. paštas: asi@asi.lt*

Рассмотрены особенности эрозионного износа шамотных огнеупоров в высокотемпературном потоке продуктов сгорания природного газа в воздухе. На созданном стенде испытаны образцы керамического материала, с использованием ультрадисперсного микропорошка SiO_2 , введенного в состав материала, изготовленного при разных температурах спекания: 800, 1 000 и 1 300 °С. Потери материала в массе изменялись от 0,001 г в первые часы испытания до 0,0005 г на сотом часу испытания образца (температура стенки образца 500 °С, скорость газового потока 5 м/с в высокотемпературном потоке продуктов сгорания 800–1 000 °С).

Исследованы структурные изменения материала, происходящие при эрозионных испытаниях продолжительностью более 100 часов (температура стенки 500 °С, скорость высокотемпературного потока продуктов сгорания 5 м/с).

Ключевые слова: эрозия, керамика, керамбетон огнеупор, высокотемпературный поток, микропорошок наночастицы, продукты эрозии, экспериментальный исследовательский стенд

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальными исследованиями показано, что созданный стенд по исследованию эрозии и старения материалов работает надежно и достаточно безопасен в эксплуатации. Эксперименты помогают накопить исследовательский материал для объяснения процессов эрозии и старения керамических и огнеупорных материалов. Как показали проведенные опыты, эрозионная стойкость зависит от множества факторов. Во время одностороннего нагревания большую нагрузку получают поверхностные слои, которые эродируют и изменяются. Потери массы образуются не только из-за механического воздействия газового потока, но и из-за диффузии отдельных составляющих потока в материал, а также в результате химических реакций и испарения некоторых компонентов.

В результате анализа стендов, описанных в литературных источниках, спроектирован, изготовлен и испытан стенд, предназначенный для исследования процессов эрозии и старения керамических и огнеупорных материалов при сжигании природного газа в воздухе.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Одним из важнейших критериев, определяющих долговечность технической керамики и огнеупоров в высокотемпературном газовом потоке, является эрозионная стойкость материалов. Эрозия – это процесс, во время которого поверхность твердого тела под воздействием потока горячего газа теряет часть массы.

Для исследований применялось специальное оборудование, с помощью которого определялись потери или прирост массы. При регулярном тепловом режиме оборудование разделяется на группы по теплоносителю. Первая группа – это оборудование, работающее на газовом, жидком и твердом топливе, образующем высокотемпературный поток продуктов сгорания, в котором проводятся испытания материалов. Вторая группа – устройства, в которых поток нагревается электроэнергией или продуктами сгорания, передавая тепло через стенку.

В статье [1] описано оборудование „Алитер-Акси“, которое работает на природном газе или жидком топливе, температура потока достигает 1 600 °С и выше. Исследуемый материал-керамика на основе Al_2O_3 , количество

которого колеблется от 96 до 33 %. Количество SiO_2 изменяется в пределах от 0,1 до 18 %. Другие составляющие – это Fe_2O_3 и CaO . Разные составы исследовались при температурах потока от 1 000 до 1 700 °С. Температура на стенках экспериментального канала достигала 950 °С. Определялась работоспособность образцов.

При наблюдении за развитием процесса разрушения получены ответы на ряд вопросов [2]. Когда поверхностная температура огнеупора достигает 1 550 °С, материалы с разным количеством Al_2O_3 дают различные результаты эрозии. В составе с 46 % Al_2O_3 , 41 % SiO_2 и 9 % CaO после 80–90 суток испытаний потери в массе от эрозионно-абразивного истирания составляют 16,4 см³, а в составе с 80 % Al_2O_3 , 11 % SiO_2 и 3,5 % CaO в тех же условиях испытаний при температуре 1 400 °С – только 2,3 см³.

Исследования больших специально литых блоков огнеупоров в потоке (температура 1 300 °С) представлены в работе [3]. Блоки, в которых сочетаются армированные подвесные панели и соединения керамики с огнеупорами, нагреваются от 50 до 1 300 °С. Ими покрывают большие емкости печей. Для крепления таких керамических блоков применяются металлические элементы. Температура эродирующей поверхности шамота достигает 265 °С, внутри монолита – 225 °С, температура панели – 170 °С, тепловая изоляция нагревается до 110 °С, металлические части – до 94 °С. Потери массы материала не фиксируются.

Следует отметить, что при оптимально загрязненной поверхности, полностью разрушаемой эрозией, важно хорошо знать все условия, определяющие ход процесса. В работе [4] рассмотрена проблема загрязнения среды, в которой проводятся эксперименты. Представлены статистические данные о количестве частиц в атмосфере, которая применяется для создания потока продуктов сгорания, и некоторые их характеристики. Это технически измельченные частицы величиной в 0,063 мм, с плотностью от 1,87 до 1,89 г/м³, рН изменяется от 4,2 до 5,5. Наличие этих частиц в атмосфере воздуха отмечено во многих местах и свидетельствует о том, что их количество меняется. Например, в 1975–1990 гг. в г. Гомеле в среде было выявлено частиц: Fe_2O_3 – 0,0043 %, MgO – 0,0005 %, Al_2O_3 – 0,0076 %, в г. Санкт-Петербурге – Fe_2O_3 – 0,0025 %, MgO – 0,0005 %, Al_2O_3 – 0,0085 %. Поскольку в промышленности употребляется воздух из окружающей среды, который, как видно, достаточно сильно загрязнен, то при сжигании природного газа в таком воздухе продукты сгорания загрязняются, а находящиеся в воздухе частицы разных оксидов оказываются в составе продуктов сгорания.

Загрязненная окружающая среда особенно опасна для керамики, используемой для передней части ракет, так как наибольшая тепловая нагрузка приходится на эту часть, поэтому последняя должна преодолеть эрозионно-абразивное воздействие твердых атмосферных частиц. Это воздействие особенно опасно для максимально нагретой поверхности.

Исследования турбинных лопаток при комнатной температуре не дали желаемых результатов, поэтому было создано оборудование, позволяющее повысить температуру исследуемых образцов до 450 °С [5]. В работе описана динамическая твердость H_D , которую определяют, оценив энергию столкновения летящей частицы (масса – m , плотность $\rho \sim 2\,600$ кг/м³).

J_E и удар ускоряющего потока в эродируемую поверхность (составная – V), в результате которого образуется кратер диаметром D и глубиной δ , которая описывается формулой (1):

$$H_D = \frac{J_E}{V}; J_E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{\pi q D^3 V^3}{12}; V = \left(\frac{D\delta^2}{2} - \frac{\delta^2}{3} \right). \quad (1)$$

Образцы, исследованные после обработки потоком, в который были введены частицы SiO_2 (60 мкм, 10 г/мин) с разным уклоном атаки, показали разное поведение лопаток в процессе абразивной эрозии. Далее приведены данные образцов CrN, обработанных потоком разной скорости под углом 90°: 104 м/с – 9,19 мм³/кг; 200 м/с – 65,4 мм³/кг; 300 м/с – 220,6 мм³/кг. При тех же условиях, но уменьшив угол атаки до 30°, получены следующие результаты: 104 м/с – 2,04 мм³/кг; 200 м/с – 15,2 мм³/кг; 300 м/с – 51,4 мм³/кг. Установлено, что при изменении угла атакующего потока с 90° до 30° потери массы эродирующей поверхности сократились в 4,3 раза.

Эродируемые материалы, такие как карбид вольфрама (WC), карбид титана (TiC) и карбид хрома (Cr_3C_2), могут быть полезны в сложных эрозионных условиях [6]. Представлено новое оборудование, с помощью которого можно изучить процесс эрозии при температуре 600 °С с добавками твердых частиц SiO_2 величиной 0,3 мм, со скоростью потока от 20 до 80 м/с с изменением угла атаки с 30° до 90°. Полученные результаты характеризуют скорость эрозии WC: угол атаки – 30°, скорость потока – 20 м/с, потери массы – 9,07 мм³/кг, но при скорости 80 м/с – потери массы составляют 88,4 мм³/кг. Такая большая разница указывает на то, что характер и механизм эрозии зависят от изменения угла атаки потока.

В работе [7] представлено оборудование, в котором температура образца достигает 600 °С. В поток воздуха скоростью 21 м/с вводится абразив SiO_2 (6,6 г/мин) величиной 250–425 мкм. Исследования проводились при температуре 600 °С, 500 °С, 400 °С, 300 °С и при комнатной температуре. Угол атаки потока на эродируемую поверхность изменялся с 30° до 90°. Получены разные значения потери массы материала. Исследования образцов более сложных составов (Si – 1,25 %, Cr – 1,40 %, Mn – 0,55 %) показали, что скорость эрозии уменьшается при нагреве от 30 до 300 °С. Повышение скорости при температуре от 300 до 500 °С уже не зависит от угла атаки потока. В статье приведены микрофотографии исследованной керамической структуры.

Большое внимание уделяется исследованию потока с твердыми частицами SiC, Al, C [8]. По величине

концентрации частиц поток бывает слабо и сильно нагруженный. Слабо нагруженный, когда при скорости 20 м/с вводятся частицы SiC размером 63–75 мкм по 2 г в минуту, а сильно нагруженный, когда при скорости 15 м/с вводятся частицы SiC размером 63–75 мкм до концентрации 10 г в минуту. Эти исследования показали, что скорость эрозии зависит от количества введенных частиц. Например, при потоке частиц 2 г/мин потери в массе образца составляют 0,56 г, при 4 г/мин – 0,64 г.

Исследуя „ускорение Кориоли“, можно отметить, что оно влияет на процесс эрозии [9]. На это указывает снижение течения потока, под влиянием которого проявляющиеся повороты потока усиливают разрушение материала. Этот процесс можно наблюдать уже после 15 мин испытания, при разных величинах угла атаки потока. Когда скорость потока 10 м/с, количество алюминиевых частиц, величиной 660 мкм, в зависимости от угла атаки изменяется от 112 мг (10°) до 500 мг (90°).

Множество приборов для исследования процессов абразивного разрушения описано в работах [10–13], в которых также приведен целый ряд оригинальных решений по изучению процесса эрозии. В этих работах описаны новые керамические материалы, изученные в оптимальных условиях.

3. КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Огнеупоры и огнеупорная керамика, разогретые в тепловых агрегатах высокотемпературным потоком, находятся в тесном контакте с агрессивной газовой средой, в которой много твердых частиц (продукты эрозии), пыли, частиц шлаков. В этих условиях происходит взаимодействие между высокотемпературной средой и эродирующей керамической поверхностью [15–18]. Характер процессов, происходящих на поверхности и внутри материала, влияет на долговечность огнеупора.

Созданный новый керамический материал в виде керамбетона со средним количеством цемента, разработанный по технологии, описанной в [14].

Материал состоит из: алюминатного цемента (Горкал – 70, Польша) – 8 %; боксит, фракция 0–1 мм – 32 %; боксит, фракция 3–5 мм – 32 %; боксит молотый – 18 %; микрочастицы SiO₂ (марка RW фуллер, Германия) – 5 % (в составе содержится до 30 % наночастиц) и ультрадисперсный алюминат (марка СТС) – 20–5 %, с применением дефлокулянта (марка FS) – 20–0,1 % и воды – 6 %.

Весь состав материала мешался в мешалке типа Гобарта и уплотнялся на лабораторном вибростоле. После суточной выдержки они удалялись из форм и после трех суток выдержки образцы проверялись в ультразвуковой установке. При средней массе образцов 744 г средняя скорость ультразвука через материал образцов составляла 5212 м/с. После этого образцы высушивались при температуре 100–110 °С в течение двух суток и проверялось

изменение скорости ультразвука: средняя масса образцов составляла 720 г, средняя скорость ультразвука через материал образцов – 5302 м/с. Как видно, средняя масса образцов уменьшилась на 3,2 %, а скорость ультразвука увеличилась на 1,7 %. Это, по-видимому, произошло из-за удаленного из структуры материала свободной воды.

Из приготовленной массы материала были изготовлены три группы керамических образцов, спеченных при разных температурах: 800 °С; 1000 °С; 1300 °С в течение 8 часов. Каждая группа спекалась отдельно.

Испытуемые образцы и экспериментальный канал с комплексным связующим, дефлокулянтами, а также с дисперсными и ультрадисперсными добавками изготовлены в Лаборатории жаростойких бетонов Института термоизоляции Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса [14].

4. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭРОЗИИ И СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

На смонтированном и испытанном, а также эксплуатируемом стенде для исследования эрозии и старения можно использовать энергоноситель природный или пропанобутановый газ. На этом стенде проводятся исследования материалов, которые во время работы подвергаются нагреву и обжигу потоком продуктов сгорания до 1000 °С. Скорость течения потока продуктов сгорания – до 10 м/с. Исследования эрозии и старения в условиях, когда высокотемпературные изделия омываются струей продуктов сгорания и исследуемый материал нагревается до температур, изменяющих его структуру и свойства, дают много информации об изменениях, происходящих в огнеупорной керамике. Для сравнительных исследований на стенде можно использовать односторонний и объемный нагрев. С помощью специальной ловушки отлавливаются продукты, загрязняющие среду. На стенде установлен механизм подъема и спуска газовой горелки, который оберегает керамические изделия от термоударов. С его помощью образцы медленно нагреваются и охлаждаются. Также сооружены системы измерения температуры и охлаждения экспериментального канала [17, 19].

Проведенные исследования показали, что стенд работает стабильно, удобен в эксплуатации, все используемые на стенде системы и измерительные приборы работают надежно.

На рис. 1 представлена схема стенда для исследования процессов эрозии и старения. Показаны проход воздуха к горелке, течение потока продуктов сгорания внутри керамического канала и крепление исследуемых экспериментальных образцов. Продукты сгорания вместе с воздухом устраниваются из стенда в трубу. Также показан механизм, оберегающий образцы от термоударов, с медленным вводом их в поток продуктов сгорания.

Приготовленные образцы укладываются вокруг внутреннего отверстия канала так, чтобы их с одной стороны

омывал поток продуктов сгорания со скоростью 5 м/с. По периметру в канале расположено восемь образцов для испытания, между ними раскладываются балластные образцы, для которых потери массы после испытания не учитывались. Размеры испытуемых образцов: (50 × 30 × 15) мм. Размер испытуемой поверхности – (30 × 15) мм. Эту поверхность нагревает тепловой поток и тепло распространяется вглубь на весь образец. Так как в основном накапливается именно эродирующая поверхность, потери в массе испытуемого материала оценивались взвешиванием образцов на аналитических весах до и после эксперимента. Температура в образце измерялась термопарами Pt – PtRh и пирометром (Cyclops C100).

Форма огнеупорного канала – пустотелый толсто-стенный цилиндр, по внутреннему пространству которого течет поток продуктов сгорания. Высота канала – 220 мм, наружный диаметр – 240 мм. На расстоянии 70 мм от поверхности канал делится на две части – верхнюю и нижнюю. Сняв верхнюю часть, на нижней, вокруг отверстия, по которому течет поток продуктов сгорания, раскладывают образцы и прижимают верхней частью канала. Таким способом образцы подвергались эрозионному разрушению продуктами сгорания. Скорость потока регулируют, используя огнеупорные каналы. Скорость изменения температуры регулировалась специально смонтированным механизмом, приближающим горелку к каналу (повышение температуры) или удаляя ее (снижение температуры). В зависимости от расстояния от горелок до канала и их фиксации устанавливаются температура его стенок и тем самым температура исследуемых образцов.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования эрозии созданного материала показали потери массы в зависимости от длительности их пребывания в эрозионных условиях. Потери эродирующей поверхности в массе изменялись от 0,001 г в первые часы до 0,0005 г на 100 часу испытания. Очевидно, что потери массы уменьшаются, видимо, изделие приспособляется к эродирующей среде и дополнительные процессы, вызванные высокой температурой, стабилизируются.

Анализируя кривые (рис. 2–4), отмечаем, что температура обжига материала имеет определенное значение при потерях массы материала до 100 часов испытания. Потери массы образцов материала, обожженного при 800 °С, до 25 часов испытания сокращаются с 0,0473 г до –0,0222 г. Затем потери массы материала увеличиваются до 0,016 г на 60-том часу испытания; далее потери постепенно сокращаются до 0,0102 г с продолжением испытания до 100 часов.

Иначе себя ведет материал, обожженный при 1 000 °С (рис. 3). Испытания показали, что в первые 5 часов испытания эродирующая поверхность материала имеет боль-

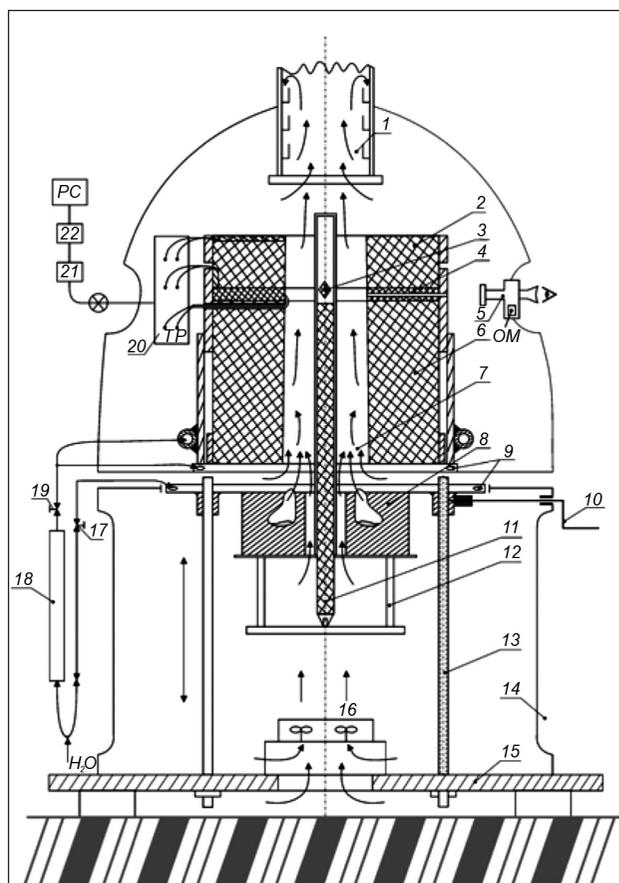


Рис. 1. Схема стенда для исследования процессов эрозии и старения.

1 – ловушка для продуктов эрозии; 2 – керамический верх экспериментального канала; 3 – объемный держатель экспериментальных образцов; 4 – образцы одностороннего нагрева; 5 – оптический пирометр; 6 – керамическая основа экспериментального канала; 7 – канал для прохода продуктов сгорания; 8 – газовая горелка; 9 – охлаждаемые конструкционные фланши; 10 – ручка управления подъемом и спуском горелки; 11 – укрепление объемного держателя; 12 – механизм поднятия и спуска горелки; 13 – винт подъема и спуска горелки; 14 – отверстия для циркуляции воздуха; 15 – основание стенда; 16 – вентиляторы; 17 – регулятор количества охлаждающей воды; 18 – ротаметр; 19 – регулятор количества воды в экспериментальном канале; 20 – пульт подключения термопар; 21 – преобразователь аналог-код; 22 – блок передачи информации

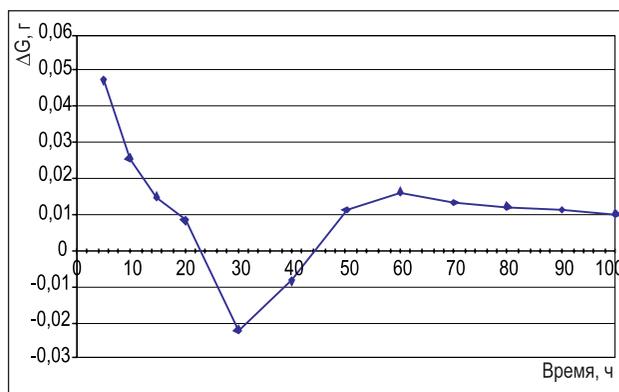


Рис. 2. Зависимость потерь массы образцов керамбетона, обожженного при 800 °С, от пребывания в эродирующей среде при температуре стенки 500 °С и скорости потока продуктов сгорания ~5 м/с

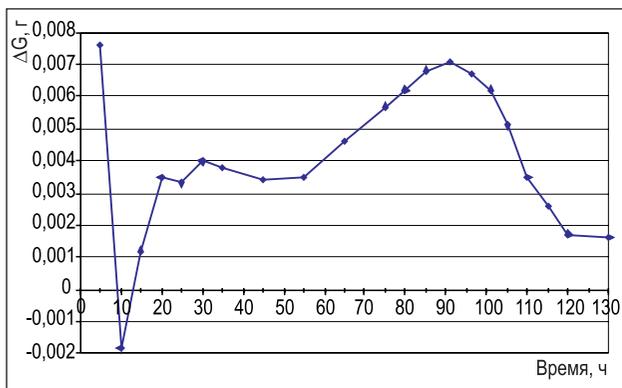


Рис. 3. Зависимость потерь массы образцов керамбетона, обожженного при 1000 °C, от времени пребывания в эродирующей среде при температуре стенки 500 °C и скорости потока продуктов сгорания ~5 м/с

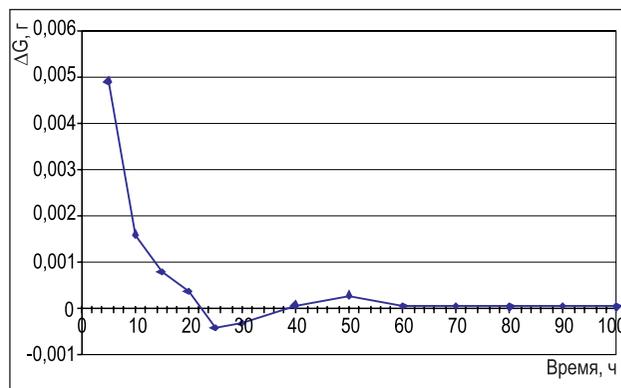


Рис. 4. Зависимость потерь массы образцов керамбетона обожженного при 1300 °C, от времени пребывания в эродирующей среде, при температуре стенки 500 °C, и скорости потока продуктов сгорания ~5 м/с

шие потери массы (до 0,0077 г). На 10-том часу испытания наблюдается прирост массы материала до -0,002 г. После этого потери массы материала увеличиваются с 15 до 90 часов и только после этого длительного периода потери массы материала наступает период сокращения потерь массы от 90 до 130 часов. Потери массы материала уменьшаются с 0,0071 г до 0,0017 г.

Материал, обожженный при 1300 °C (рис. 4), несет умеренные потери в течение первых 5 часов испытания (до 0,0049 г), уменьшение потерь до 0,0004 г на 20-том часу испытания и небольшой прирост массы материала в течение 25–40 часов испытания. Дальнейшие эрозионные испытания показали незначительные стабильные потери массы материала и стабильную работу эродирующей поверхности материала до 100 часов.

Измерение температуры эродирующей поверхности (рис. 5) показало, что нагрев поверхности образца достаточно стабилен и от средней температуры внутренней стенки канала (500 °C) отличается в пределах 5 %.

Температура стенки канала регулируется с помощью водоохлаждаемого фланша. Температуры экспериментальных образцов, канала и фланша измерялись с помощью термопары Pt–PtRh. Сварочная точка термопары приближалась к эродирующей поверхности до 0,3 мм. Показания термопар и пирометра (Cuxlops C100) фиксировались в базе данных электронной системы измерения температур (рис. 5).

Скорость повышения температуры (8 °C/мин) при нагреве канала с образцами подобрана путем эксперимента, так как при этой скорости не отмечено влияние термоудара на целостность материала [20].

Таким образом, канал и образцы нагревались до выхода в экспериментальный режим за 1,5–2 часа. После эксперимента температура снижалась со скоростью 5 °C/мин. По достижении 350 °C температуры эродирующей поверхности материала отключался газ и выключались горелки. Далее канал охлаждался естественным путем.

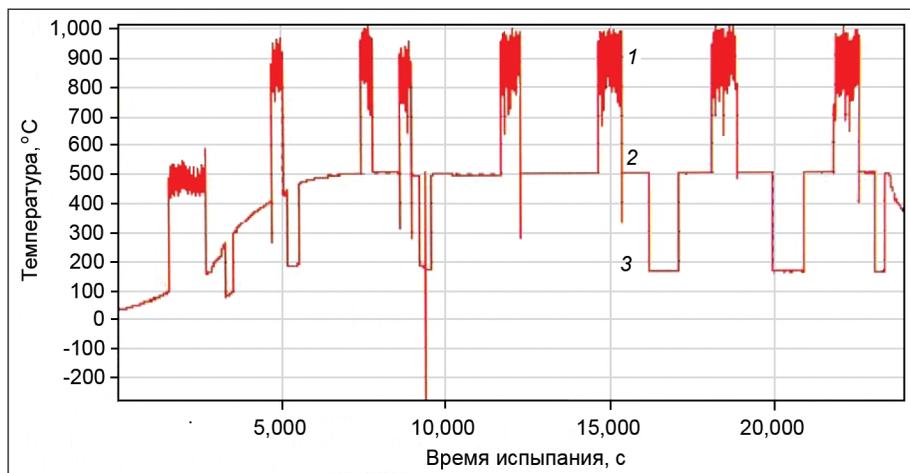


Рис. 5. Распределение температуры на эродирующей поверхности образца в зависимости от продолжения эксперимента, скорость потока продуктов горения ~5 м/с.
1 – температура потока; 2 – температура эродирующей поверхности образца; 3 – температура задней части образца

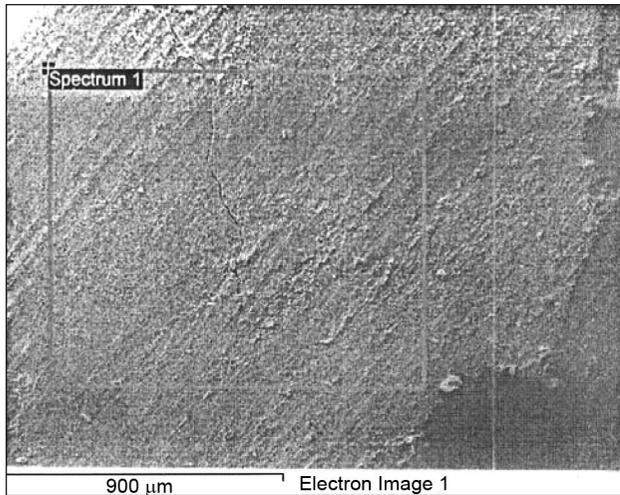


Рис. 6. Поверхность исходного образца

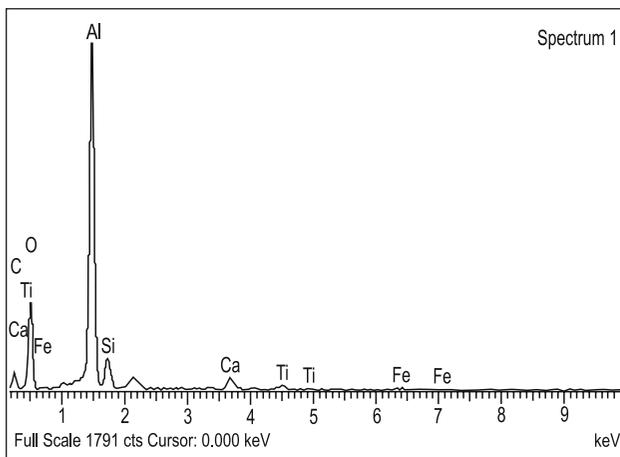


Рис. 7. Элементный анализ материала исходного образца

Образцы взвешивались до и после эксперимента на аналитических весах ВЛА-200_r-М и устанавливались потери массы материала.

Проведенные структурные исследования испытанных материалов и наблюдения за эродирующей поверхностью показали, что процесс разрушения поверхности материала достаточно заметен. Исходная поверхность материала, подготовленная к испытанию на эрозионную стойкость, показана на рис. 6. Поверхность не имеет очагов разрушения, видны только следы неровностей прессформы. Элементный анализ материала (рис. 7) показал следующий состав: CaCO_3 – 23,15 % мас.; SiO_2 – 36,40 % мас.; Al_2O_3 – 32,80 % мас.; SiO_2 – 3,85 % мас.; волластонит $\text{CaCO}_3[\text{SiO}_3\text{O}_2]$ – 2,02 % мас.; Ti – 1,01 % мас.; Fe – 0,78 % мас., элементный состав материала определялся по стандартам: C – CaCO_3 (1-Jun-1999, 12:00 AM); O – SiO_2 (22-Jul-2004, 10:15 PM); Na – Albite (1-Jun-1999, 12:00 AM); Al – Al_2O_3 (1-Jun-1999, 12:00 AM); Si – SiO_2 (22 Jul 2004, 10–16 PM); K-MAD-10 Feldspar (1-Jul-1999, 12:00 AM); Ca – Wollastonite (1-Jul-1999, 12:00 AM); Ti – Ti (1-Jul-1999, 12:00 AM); Fe – Fe (1-Jul-1999, 12:00 AM);

Cl – KCl (1-Jul-1999 12:00 AM); S – FeS_2 (1-Jul-1999, 12:00 AM); эти стандарты применялись во всех элементных анализах.

После испытания образцов материала (обожженных при 800 °C) в эрозионных условиях при температуре стенки 500 °C и скорости потока ~5 м/с эродирующая поверхность материала показана после 100 часов испытания (рис. 8). На рисунке видны очаги разрушения эродирующей поверхности материала. Их множество, и они расположены по всей поверхности почти равномерно. Глубина данных очагов невелика, во многих случаях они соединены между собой, создавая определенные локальные площади разрушения. Элементный анализ эродировавшей поверхности материала (рис. 9) показал следующий состав материала: CaCO_3 – 24,79 % мас.; SiO_2 – 40,79 % мас.; Al_2O_3 – 23,23 % мас.; волластонит – 2,71 % мас.; Ti – 1,19 % мас.; Fe – 0,92 % мас.

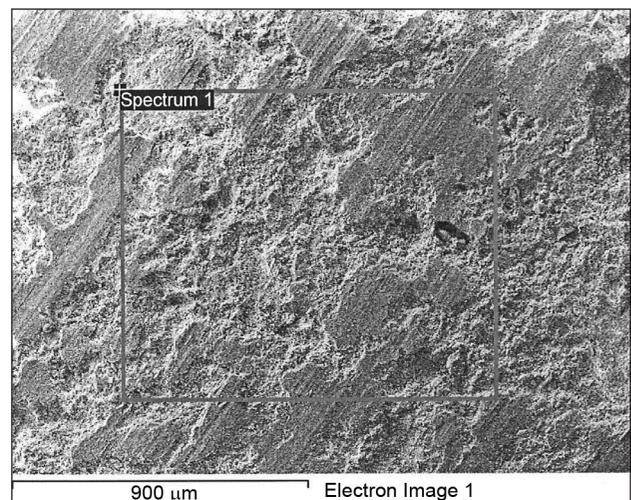


Рис. 8. Эродировавшая поверхность материала, обожженного при 800 °C (температура стенки 500 °C, скорость потока 5 м/с), испытанного в течение 100 ч

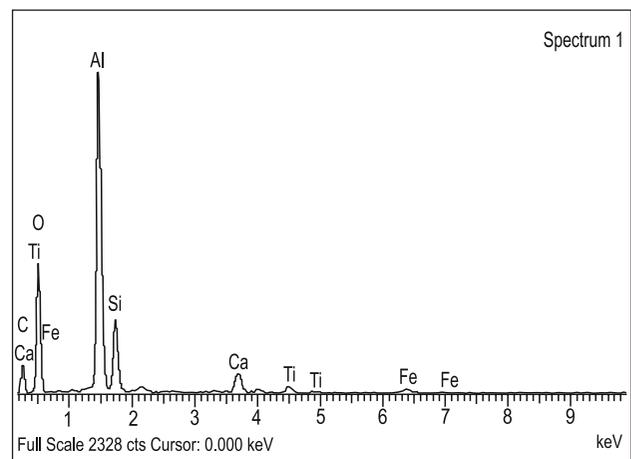


Рис. 9. Элементный анализ эродировавшей поверхности образца, обожженного при 800 °C (температура стенки 500 °C, скорость потока 5 м/с), испытанного в течение 100 ч

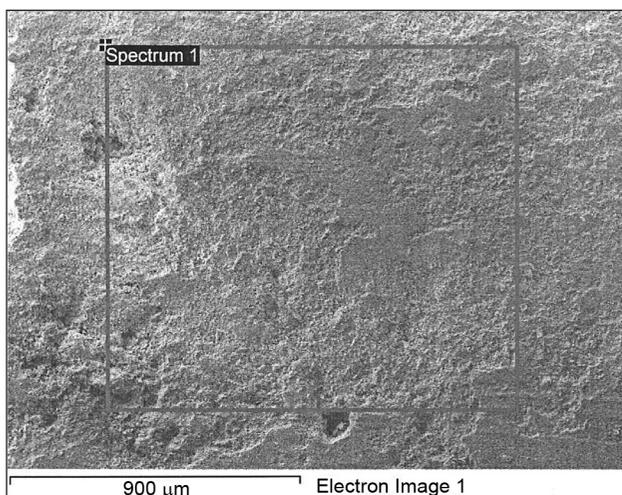


Рис. 10. Эродировавшая поверхность материала, обожженного при 1 000 °С (температура стенки 500 °С, скорость потока 5 м/с), испытанного в течение 125 ч

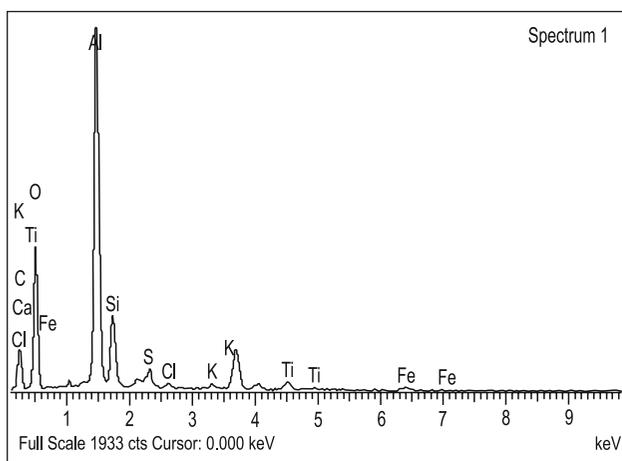


Рис. 11. Элементный анализ эродировавшей поверхности образца, обожженного при 1 000 °С (температура стенки 500 °С, скорость потока 5 м/с), испытанного в течение 125 ч

При определении потерь массы материала образцов, обожженных при 1 000 °С, в потоке продуктов сгорания (температура стенки образца – 500 °С, скорость – 5 м/с) отмечена эродирующая поверхность образца, испытанного в течение 125 ч, когда температура потока достигает 1 000 °С. На рис. 10 видно, что на поверхности омываемой высокотемпературным газовым потоком продуктов сгорания образовались глубокие очаги разрушения, чего не наблюдалось на поверхности образцов, изображенных на рис. 8. Очаги разрушения уходят вглубь материала на 0,2–0,4 мм постепенно расширяясь и объединяясь с другими рядом возникающими очагами разрушения. Это приводит к значительным потерям массы материала, что видно на рис. 3.

На рис. 11. показан элементный анализ образцов материала, находившихся в эрозионных условиях продуктов сгорания в течение 125 ч, показал следующий

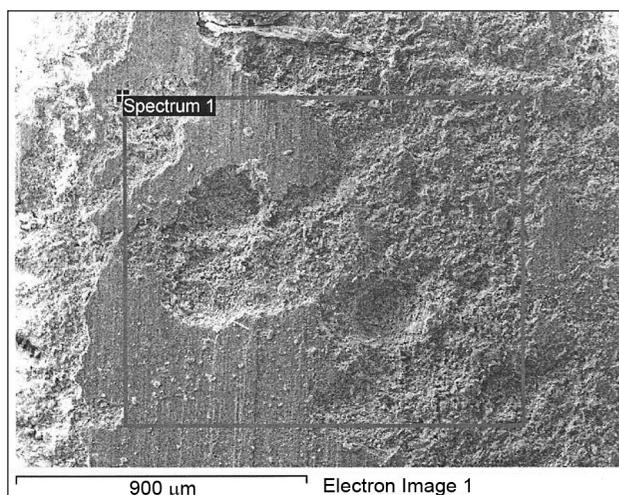


Рис. 12. Эродировавшая поверхность материала, обожженного при 1 300 °С (температура стенки 500 °С, скорость потока 5 м/с), испытанного в течение 100 ч

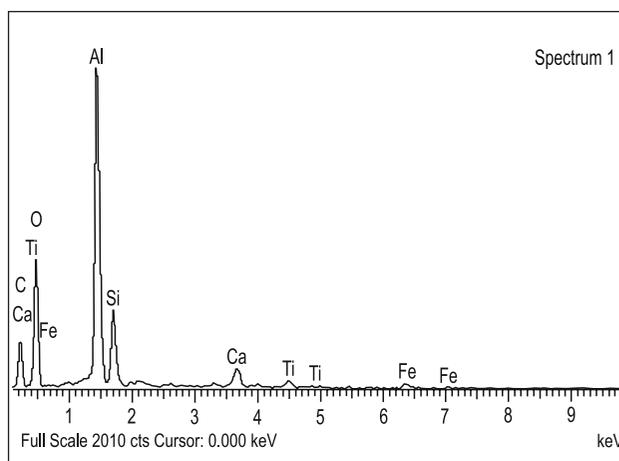


Рис. 13. Элементный анализ эродировавшей поверхности образца, обожженного при 1 300 °С (температура стенки 500 °С, скорость потока 5 м/с), испытанного в течение 100 ч

состав: CaCO_3 – 14,93 % мас., SiO_2 – 43,42 % мас., Al_2O_3 – 25,46 % мас.; SiO_2 – 6,11 % мас.; KCl – 1,48 % мас.; полевой шпат – 0,40 % мас.; воластонит $\text{Ca}_3[\text{SiO}_3\text{O}_9]$ – 5,18 % мас.; Ti – 1,51 % мас.; Fe – 1,01 % мас.; FeS_2 – 1,48 % мас.

На рис. 12 показана эродировавшая поверхность образцов материала (того же состава, но обожженного при 1 300 °С), испытанных на эрозионную стойкость в высокотемпературном потоке продуктов сгорания (температура стенки 500 °С, скорость потока 5 м/с, температура потока 1 000 °С). Очаги разрушения немногочисленны, и их глубина невелика. В основном наблюдаются поверхностные мелкие разрушения отдельных площадей эродирующей поверхности.

Химический состав эродировавшей поверхности (рис. 13.) таков: CaCO_3 – 30,74 % мас., SiO_2 – 38,68 % мас., Al_2O_3 – 20,46 % мас., SiO_2 – 5,58 % мас., воластонит

($\text{Ca}_3[\text{SiO}_3\text{O}_9]$) – 2,18 % мас., Ti – 1,11 % мас., Fe – 1,25 % мас. (рис. 13).

Проведенные эрозионные исследования материала, обожженного при 1 300 °С, показали незначительные потери массы материала. В первые 20 часов испытания потери заметно сокращаются – с 0,0049 г до 0,0004 г. Далее – от 20 до 35 часов – идет прирост массы до 0,0003 г. В период испытаний от 35 до 100 часов фиксируются очень маленькие потери массы материала (с незначительным их увеличением на 50 часу испытания).

6. ВЫВОДЫ

1. Создан материал с использованием ультрадисперсного микропорошка SiO_2 , введенного в состав керамики, изготовленный при разных температурах спекания: 800; 1 000; 1 300 °С.

2. Выполнены экспериментальные исследования по определению потерь массы созданного шамотбетонного материала при эрозионных испытаниях (температура стенки 500 °С, скорость потока 5 м/с, температура потока продуктов сгорания 800–1 000 °С).

3. Для исследования керамических и огнеупорных материалов в высокотемпературном потоке продуктов сгорания (исключая термоудар) создана экспериментальная установка по определению эрозионной стойкости и старения материала.

4. Исследованы структурные изменения материала, возникающие при эрозионных испытаниях продолжительностью более 100 часов (температура стенки 500 °С, скорость высокотемпературного потока продуктов сгорания 5 м/с).

5. Методом элементного анализа установлен их состав.

6. Показано, что материал, обожженный при 1 300 °С, обладает лучшей эрозионной стойкостью по сравнению с материалами, обожженными при 800 и 1 000 °С.

Поступило 10 04 2010

Принято 15 07 2010

Литература

- Denisov D. E., Artamonov M. K., Popova M. E. Elements of gas cleaning and dust removal systems lined with refractory concretes. Wear-resistant cement-free refractory mixes. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2007. Vol. 48. N 5. P. 322–336.
- Denisov D. E., Zhidkov A. B., Popova M. E. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2007. Vol. 48. N 1. P. 4–8.
- Shokhov I. I., Kalinina N. N., Belkin A. S. et al. Construction of renewable roofs for continuous heating furnace. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2007. Vol. 48. N 5. P. 337–341.
- Ramashin A. G., Suzdaltsev E. I., Rusin M. Yn. Fabrication of large-sized complex-shaped components from quartz ceramics: Research and practical aspects. Part 1. Statistical analysis of the stability of the technological process. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2004. Vol. 45. N 6. P. 435–470.
- Oka Y. J., Yoshida T., Yamoda Y. et al. Evaluation of erosion and fatigue resistance of ion plated chromium nitride applied to turbine blades. *Wear*. 2007. Vol. 263. P. 379–385.
- Antonov M., Husainova J., Pirso J., Volobueva O. Assessment of mechanically mixed layer developed during high temperature erosion of cermets. *Wear*. 2007. Vol. 263. P. 878–886.
- Venugopal K., Agraval M. Evolution of the sprayed coatings for erosion protection of tubes in atmospheric fluidised bed combustion (AFBC) boilers. *Wear*. 2008. Vol. 264. P. 139–145.
- Gopi K. R., Nagarajan R., Rao S. S., Mandal S. Erosion model on alumina ceramics: A retrospection, validation and refinement. *Wear*. 2008. Vol. 264. P. 211–218.
- Tian H. H., Addie G. R., Barsh E. P. A new impact erosion testing setup through coriolis approach. *Wear*. 2007. Vol. 263. P. 289–294.
- Cellotta D. W., Qureshi U. A., Goulet D. P. et al. Sand erosion testing of novel compositions of hard ceramics. *Wear*. 2007. Vol. 263. P. 278–283.
- Deng T., Binglen M. S., Bradley M. S. et al. A comparison of the gas-blast and centrifugal-acceleration erosion testers. Wear studies of composites at normal incidence. *Wear*. 2008. Vol. 265. P. 1129–1135.
- Harsha A. P., Sanjeev K. J. Erosive wear studies of composites at normal incidence. *Wear*. 2008. Vol. 265. P. 1129–1135.
- Гаршин А. П., Гропянов В. М., Зайцев Г. П., Сетенов С. С. *Керамика для машиностроения*. Москва: Научтехлитиздат, 2003. 384 с.
- Goberis S., Antonovič V. *Kaitrai atsparūs šamotbetonai*. Vilnius: Technika, 2007. 360 p.
- Бакунов В. С., Беляков А. В., Лукин Е. С., Шаяхметов У. Ш. *Оксидная керамика: спекание и ползучесть*. Москва, 2007. 584 с.
- Tyutine N. A., Lechenko Y. A., Skoichilov A. A., Varyukov M. J. High-temperature tunnel furnace for drying and firing spinel-containing refractories. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2006. Vol. 47. N 4. P. 209–211.
- Abraitis R. *Techninės keramikos technologija ir savybės*. Kaunas: Technologija, 2003. D. I–II. 683 p.
- Красовицкий Ю. В., Этнин Ю. В. и др. Оборудование для разделения пылегазовых систем. В кн.: *Машины и аппараты химических и нефтехимических производств*. Москва: Машиностроение, 2004. Т. IV-12. 832 с.
- Abraitis D., Abraitis R. Termoizoliacinės medžiagos, dirbančios energetiniuose katiluose. *KTU konferencijos pranešimų medžiaga „Pažangioji statyba“*. Kaunas: Technologija, 2007. P. 69–75.
- Abraitis D., Baltušnikas A. Analysis of the structural alteration in ceramic materials when threatened with high-temperature heat flow. *Proceedings of the 17th International Baltic Conference “Materials Engineering 2008”*. Kaunas: Technologija, 2008. 70 p.

Rimgaudas Abraitis, Darius Abraitis, Egidijus Blaževičius,
Stasys Goberis

EROZIJOS IR SENĖJIMO PROCESŲ TYRIMAS AUKŠTATEMPERATŪRĖSE STATYBINĖSE MEDŽIA- GOSE JAS PAVEIKUS DEGIMO PRODUKTŲ SRAUTU

Santrauka

Pramoniniuose energetiniuose įrenginiuose plačiai naudojami įvairios paskirties šiluminiai agregatai, kurie eksploatuojami temperatūrose, aukštesnėse nei 1 000 °C. Įkaitusią keramiką ir ugniaatsparus ardančiai veikia agresyvi aplinka, aukštatemperatūriai dujų srautai, kuriuose yra kietųjų dalelių, erozijos produktų, paviršiai patiria terminius smūgius.

Uždaruose tūriuose, sąveikaujant įkaitusiai sienelei ir agresyviam degimo produktų srautui, eroduoja keraminis paviršius, keičiasi jo struktūra ir sudėtis, keičiasi ir medžiagos geometriniai parametrai, medžiaga netenka masės.

Atlikti šamotbetonių gaminių erozijos ir senėjimo procesų tyrimai esant 500 °C sienelės temperatūrai ir 5 m/s srauto greičiui. Sukurtos naujos medžiagos, į kurių sudėtį įtrauktos nanodalelės, parodė skirtingą erozinį atsparumą dėl jų sukepinimo temperatūros (800, 1 000 ir 1 300 °C).

Aprašytas sukurtas eksperimentinis tyrimų stendas tokiems eksperimentams atlikti.

Raktažodžiai: erozija, keramika, ugniaatsparas, aukštatemperatūris srautas, nanodalelės, erozijos produktai, eksperimentinis tyrimų stendas

Rimgaudas Abraitis, Darius Abraitis, Egidijus Blaževičius,
Stasys Goberis

INVESTIGATION OF EROSION AND AGEING PROCESSES IN HIGH-TEMPERATURE BUILDING MATERIALS UNDER THE IMPACT OF COMBUSTION PRODUCT STREAM

Summary

In industrial energetic equipment, thermal units of various purpose exploited at temperatures higher than 1 000 °C are widely used. Incandesced ceramics and fire-resistants are destructively affected by high-temperature gas flows containing hard particles and erosion products; their surfaces are loaded by thermal blows, and the environment is aggressive.

In closed volumes, during an interaction between an incandesced wall and aggressive combustion product stream, the ceramic surface erodes, its structure and composition undergo alteration. Since the material loses its mass, its geometrical parameters change as well.

The investigation of erosion and ageing processes in fireclay products was carried out at the wall temperature of 500 °C and stream speed 5 m/s. New materials, which included nanoparticles, have been composed. They demonstrated different erosion resistance in relation to the clinkering temperature (800, 1 000 and 1 300 °C).

An experimental research stand constructed for performing such tests is described.

Key words: erosion, ceramics, fire-resistance, high-temperature stream, nanoparticles, erosion products, experimental research stand