К. С. Камышная (🖂), д. т. н. Т. А. Хабас

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

УДК 666.3:546.641-31-127:66.065.51 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПОР ЗАДАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ В КЕРАМИКЕ ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ЗА СЧЕТ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАРБАМИДА

Показана возможность получения пористой керамики на основе смесей микро- и нанопорошка диоксида циркония с применением кристаллизации карбамида в суспензии. Исследованы различные режимы охлаждения суспензии оксидных порошков (на воздухе, в морозильной камере, в снегу). Показано, что пористость и размер пор спеченной керамики напрямую зависят от состава и метода охлаждения суспензии. В результате получена керамика пористостью 30-60 % с диаметром пор 0,2-200 мкм.

Ключевые слова: диоксид циркония, карбамид, пористая керамика, структура спеченной керамики, порообразующая добавка.

ВВЕДЕНИЕ

Керамические материалы имеют широкий спектр применения за счет высокой химической и термической устойчивости. Особое внимание при этом стоит уделять пористой керамике, которая широко используется для создания фильтров, катализаторов, биоимплантатов и т. д. [1-7]. Для получения пористой керамики появляются новые методы и исследуются новые выгорающие добавки, в том числе метод замораживания [2, 8-10], использование узкофракционных зерен наполнителя [4, 11], введение и последующие удаление добавок при спекании [12–15], реплика полимерной губки [16], вспучивание в ходе термообработки [17], вовлечение в суспензию воздуха [18], химическое порообразование [19] и т. д. Но если при создании пор механически вводимым крупнодисперсным выгорающим порообразователем достаточно легко добиться нужного размера и распределения пор по размерам, то основными недостатками микропористой керамики (диаметр пор 10-125 мкм) являются невозможность регулирования конфигурации пор, а также неравномерное распределение пор по объему материала. Микропористая керамика может быть использована в качестве фильтров для очистки отходящих промышленных газов от пыли, что очень актуально на металлургических производствах. При этом установлено, что наиболее опасными частицами для здоровья человека являются частицы диаметром менее 5 мкм, т. е. необходимо создать

> ⊠ K. C. Камышная E-mail: ksenia@tpu.ru

поры диаметром менее 5 мкм. Одним из наиболее перспективных методов получения тонкопористой керамики с порами определенных конфигурации и направления является кристаллизация легко выгорающей добавки непосредственно в водно-керамической суспензии, в частности метод замораживания шликера с органической добавкой и последующим ее удалением [20, 21]. Метод основан на образовании кристаллов удлиненной формы при охлаждении насыщенного раствора органического вещества, образующего суспензию с керамическим порошком. При удалении органического вещества в керамическом материале образуются поры, имеющие конфигурацию выгоревших кристаллов. Отличительными достоинствами этого метода являются отсутствие в керамике остатков выгорающего вещества-порообразователя, возможность регулирования размера и конфигурации пор. В настоящее время для этого способа исследованы различные суспензии, содержащие воду, камфен, камфору, карбамид [21]. Но имеющиеся в литературе данные недостаточны для формирования четкого представления о необходимых условиях проведения такого процесса. Анализ свойств добавок [21-23] показывает, что особое внимание следует уделить карбамиду (H₂NCONH₂) из-за его способности формировать кристаллы игольчатой формы. Это перспективно для получения фильтрующих керамических материалов с упорядоченно расположенными канальными порами.

Цель данного исследования — изучение влияния условий термообработки суспензии оксидного порошка в насыщенном растворе карбамида на формирование пористой структуры керамического материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходного материала для исследования использовали микропорошок диоксида циркония (производство Чепецкого механического завода, средний размер частиц 0,23 мкм), нанопорошок диоксида циркония (СХК, Россия, средний размер частиц 60 нм). Удельную поверхность частиц порошка определяли на анализаторе «Quantachrome Nova-2200-е». В качестве порообразующей добавки использовали карбамид H₂NCONH₂ производства Кемеровского агрохимического завода. Поведение кристаллов карбамида при нагревании изучали методом синхронного термического анализа на приборе «STA 449 F3 Jupiter» фирмы «Netzsch-Gerätebau», Германия.

Формирование пористой структуры керамики проводили по следующей схеме: растворение гранул карбамида в горячей воде до получения насыщенного раствора карбамида → смешивание раствора карбамида с порошком диоксида циркония при поддержании постоянной температуры, получение шликера для литья → охлаждение формы со шликером до образования кристаллов карбамида → первый этап сушки в различных условиях → извлечение образца из формы - сушка и высокотемпературная обработка с получением пористой керамики. В качестве формы использовали металлическую цилиндрическую емкость с отношением диаметра к высоте 1,3 : 1,0. Материал формы выбирали с учетом необходимой теплопроводности для обеспечения быстрой теплопередачи окружающая среда - суспензия. Теплопроводность материала формы 197 Вт/(м·°С).

Сначала гранулы карбамида растворяли в горячей воде (температура горячей воды 65 °С, температура раствора сразу после растворения карбамида 50 °С). Для сохранения температуры раствора форму погружали в термостат. В насыщенный раствор добавляли порошок диоксида циркония и суспензию тщательно перемешивали в течение 1 мин (температура шликера поддерживалась на уровне 48 °С). Поведение каждого порошка исследовали как по отдельности, так и в сочетании порошков микро- и наноразмера (в соотношении 50/50 мас. %).

Для выбора оптимальных условий формования и наблюдения роста кристаллов карбамида в суспензии (шликере) были испытаны четыре различных варианта режима охлаждения и сушки. В первом варианте кристаллы карбамида формировали в естественных условиях охлаждения до температуры окружающей среды (24 °C) в течение 30-45 мин. Во втором варианте охлаждения форму со шликером помещали в снег (-1 °C), при этом температура шликера, помещенного в снег, снижалась от 48 до 10 °C со скоростью 0,76 °C /с. Форму оставляли в данных условиях на 10 мин, в течение этого времени температура шликера снизилась до 2 °C. Третий вариант охлаждения заключался в перемещении емкости с горячим шликером в холодильную камеру (-3 °C). При четвертом варианте охлаждения для создания градиента температуры в определенном направлении верхнюю часть и стенки формы изолировали от контакта с окружающей средой. Процесс роста кристаллов в данной серии образцов протекал при погружении закрытой формы в снег. Для удаления воздуха, адсорбированного на поверхности порошка, проводили отдельные эксперименты с вакуумированием суспензии в горячем или холодном виде. Как будет показано ниже, эта операция приводит к изменению структуры спеченных образцов.

Сушку всех образцов проводили в эксикаторе над гранулами хлорида кальция для удаления избытка влаги. Образцы спекали при 1580 °С в среде воздуха со скоростью подъема температуры около 2 °С/мин и выдержкой при конечной температуре 2 ч. Морфологию спеченного керамического материала исследовали при помощи растрового электронного микроскопа «Jeol JSM-7500FA».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование нанопорошка

Частицы нанопорошка — полые, скорлупообразные образования неправильной формы



Рис. 1. Микрофотографии порошка ZrO₂: *а* — нанопорошок; *б* — микропорошок

(рис. 1, *a*), собранные в агрегаты размерами 10-20 мкм. Микропорошок (рис. 1, *б*) представляет собой сферические частицы, собранные в крупные агрегаты. Так как нанопорошок имел высокую удельную поверхность, что затрудняло процесс приготовления суспензии, то предварительно была проведена его термообработка при 600 °C со скоростью нагрева 3 °C/мин и выдержкой при конечной температуре 30 мин. Насыпная плотность порошка до температурной обработки 184, после обработки 248 кг/м³.

Исследование порообразователя

Для исследования процессов, протекающих в образцах при нагревании кристаллов карбамида, была проведена дифференциальносканирующая калориметрия исходного вещества (в виде гранул) и игольчатых кристаллов карбамида, полученных в эксперименте (рис. 2). Из термограмм (см. рис. 2) следует, что поведение карбамида в виде исходных гранул и в виде кристаллов, формирующихся в объеме оксидной суспензии в результате эксперимента, практически одинаково. В диапазоне от 130 до 150 °С происходит плавление карбамида. При последующем нагревании протекает сложная эндотермическая реакция. ТГ-кривая имеет двухступенчатый вид. Первая ступень характеризуется большей потерей массы (49 %), чем вторая. Первая потеря массы протекает в диапазоне 175-230 °С, в диапазоне от 232 до 256 °C образуется биурет ($C_2H_5N_3O_2$, или (H_2NCO)₂NH) с одновременным выделением аммиака: $2H_2NCONH_2 \rightarrow$ \rightarrow (H₂NCO)₂NH+NH₃. Вторая потеря массы при полном разложении карбамида связана с выделением изоциановой кислоты HNCO в интервале от 365 до 405 °C [24]. Таким образом, к температуре 400-450 °C заканчивается процесс разложения карбамида и формируется пористая структура керамики.



Рис. 2. ДСК- и ТГ-кривые карбамида: — гранулы; ---- кристаллы

Исследование влияния режимов охлаждения на конфигурацию пор

Исследование необожженных образцов после сушки показывает, что при резком изменении температуры (за счет погружения дна формы в снег) кристаллы карбамида упорядоченно располагаются параллельно друг другу. В процессе кристаллизации карбамида в суспензии порошок окружает каждый кристалл карбамида. Отдельные кристаллы имеют конфигурацию иглы толшиной 50-100 мкм и плиной 30-50 мм (рис. 3). Можно утверждать, что при изменении температуры растущие кристаллы карбамида пронизывают объем шликера и при выгорании во время обжига создают пористую структуру. В результате после обжига образуется вытянутая пора. Использование смеси микро- и нанопорошков позволяет с более высокой степенью заполнить пространство между кристаллами карбамида. При этом создаются оптимальные условия для удаления избыточной влаги. При проведении эксперимента отмечено, что использование морозильного оборудования нецелесообразно, так как происходит мгновенное замерзание всего образца и на разрезе сырых образцов не наблюдается однонаправленного расположения кристаллов. При извлечении образца из морозильного оборудования вода быстро оттаивает и образец превращается в желеобразную массу, что приводит к тому, что образец невозможно извлечь из формы без повреждений.

После спекания в разрезах образцов (кроме образца с изоляцией формы) отчетливо видны четыре слоя с различной морфологией кристаллов. Первый слой характеризуется однонаправленными тонкими порами, второй и четвертый слои имеют также пористую структуру, но разнонаправленные поры неправильной конфигурации. Промежуточный третий слой имеет практически беспористую плотноспеченную



Рис. 3. Микроструктура высушенного образца, полученного при охлаждении в снегу с изоляцией от внешней среды верхней открытой части формы тонкопленочным материалом. Оксидный компонент исходной суспензии — микро- и нанопорошок ZrO₂ в соотношении 50/50 мас. %, массовое соотношение карбамид : вода : порошок 1,4:0,8:1

структуру. Это объясняется тем, что при охлаждении формы рост кристаллов карбамида начинается снизу формы (от наиболее холодной поверхности), в основном объеме шликера образуются тонкие однонаправленные кристаллы карбамида — первый слой. При этом при увеличении расстояния от охлаждаемого дна формы температура шликера повышается. Такое изменение температуры сказывается на том, что на некоторой высоте образуются разнонаправленные кристаллы карбамида — второй слой. В открытой сверху емкости одновременно, но с



Рис. 4. Микрофотография спеченного образца, состоящего из нанопорошка ZrO₂, охлаждаемого в условиях морозильной камеры (соотношение карбамид/раствор/порошок 1,4/0,8/1): 1 — слой с однонаправленными порами; 2, 4 — слои с разнонаправленными порами; 3 — однородный слой с наименьшим количеством пор

меньшей скоростью меняется также и температура верхней поверхности шликера. Скорость изменения температуры в нижних слоях шликера (до 1/2 высоты формы) составляет 0,76 °С/с, в верхних слоях 1-1,5 °С/с. Разница в скорости изменения температуры приводит к тому, что и на поверхности шликера начинают формироваться разнонаправленные тонкие короткие кристаллы, которые образуют четвертый слой. За счет разнонаправленного положения кристаллов слой приобретает пористую структуру. Вследствие разности скоростей изменения температуры и разного направления роста кристаллов снизу и сверху шликера образуется третий, промежуточный слой. В результате в разрезе образцов фиксируются четыре различных по структуре слоя: слой с однонаправленными порами (первый), слои с разнонаправленными порами (второй и четвертый) и более однородный с меньшим количеством пор переходный (третий) слой (рис. 4). При этом толщина переходного слоя варьируется от 135 до 350 мкм в зависимости от условий охлаждения формы. Наибольшую толщину переходного слоя имеет образец, полученный вакуумированием горячей суспензии с последующим охлаждением в морозильной камере. Схема процесса образования слоев показана на рис. 5.

После сушки и спекания в разрезах образца, охлаждаемого с изоляцией верхней открытой части формы от внешней среды тонкопленочным материалом с низкой теплопроводностью (образец 5), отчетливо видны кристаллы карбамида, расположенные в одном направлении



(перпендикулярно поверхности замерзания); слоистая структура отсутствует (рис. 6). Этот свидетельствует факт о том, что именно такие условия наиболее пригодны для данных суспензий и материала формы. Полученные результаты объясняются тем, что при изоляции верхней открытой части формы происходит более медленное охлаждение поверхности шликера, что позволяет формироваться удлиненным кристаллам карбамида в направлении от дна к верху формы.

Общая пористость разрабатываемой керамики складывается из пор, оставшихся после выгорания кристаллов

Рис. 5. Зависимость распределения пор по размерам в образцах 1-5, спеченных при 1580 °C, от состава и условий охлаждения шликера: 1 - 100 мас. % нанопорошка ZrO_2 ; 2 - 100 мас. % микропорошка ZrO_2 ; 3 - 50 мас. % нанопорошка $ZrO_2/50$ мас. % микропорошка ZrO_2 , вакуумирование горячей суспензии; 4 -то же, вакуумирование холодной суспензии; 5 -то же, охлаждение формы с изоляцией от внешней среды верхней открытой части формы

карбамида, и пор неправильной или сферической формы, появление которых обусловлено особенностями спекания частиц оксида и количеством захваченного (адсорбированного) воздуха. В общем случае операция вакуумирования, уменьшая давление воздуха над поверхностью суспензии, облегчает ее дегазацию и уменьшает пористость образца. Но при вакуумировании суспензии, в разной степени нагретой и склонной к изменению фазового состава, эффект от операции вакуумирования может быть различным. Удаление пузырьков, захваченных порошком, способствует прилипанию оксидных частиц к кристаллам карбамида. Это формирует канальную структуру будущих пор. В то же время при повышении температуры жидкости газовыделение усиливается, следствием этого является уменьшение общей пористости керамического материала. Использование процесса вакуумирования может и увеличить пористость образцов (см. рис. 6, образцы 3 и 4). Это объясняется тем, что при вакуумировании происходят одновременные процессы удаления воздуха, быстрого охлаждения суспензии и, соответственно, образования новых кристаллов карбамида.

Процесс вакуумирования суспензии влияет не только на общую пористость, но и на характер распределения пор по размерам. При вакуумировании в горячей среде (48 °C) в образцах после спекания образуется большее количество пор в диапазоне 0,2-5,0 мкм. Следовательно, пористость, а также распределение пор по размерам в образце напрямую зависят как от размеров частиц исходного порошка, так и от метода охлаждения суспензии. При использовании только нанопорошка в образце наблюдается распределение пор в диапазоне 0,2-5,0 мкм, при использовании только микропорошка в образце присутствуют в основном поры в диапазоне 5,0-200,0 мкм (см. рис. 5). Использование смеси микро- и нанопорошков способствует созданию бимодального распределения пор с двумя интервалами распределения пор 5,0-200,0 и 0,2-5,0 мкм (см. рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода кристаллизации выгорающей добавки в шликере позволило получить пористую керамику с вытянутыми порами в виде игл. Морфология пористого пространства зависит от гранулометрического состава оксидной смеси, в частности от содержания в ней нанопорошкового компонента и применяемой схемы термообработки суспензий. Длина пор варьируется от 100 мкм до 1 мм, диаметр от 0,2 до 200 мкм. В спеченных образцах отмечается бимодальное распределение пор по размерам. При этом наиболее предпочтительные прони-



Рис. 6. Микрофотография спеченного образца, состоящего из смеси нано- и микропорошков ZrO₂. Охлаждение формы с изоляцией верхней открытой части (соотношение карбамид/раствор/порошок 1,4/0,8/1)

цаемые поры, необходимые для очистки воздуха от загрязняющих веществ (в диапазоне от 0,2 до 5 мкм), фиксируются в керамике, суспензия которой содержит наночастицы и подвергается в процессе кристаллизации вакуумированию в горячем виде.

Размеры пор спеченных образцов меньше размера игл карбамида в сырце, что объясняется усадкой оксидной матрицы во время спекания. Использование смеси из микро- и нанопорошков способствует максимальному уплотнению перегородок в пористой керамике. Наиболее подходящим для формирования упорядоченной пористой структуры керамики является процесс охлаждения с изоляцией верхней открытой части формы от внешней среды тонкопленочным материалом, препятствующим быстрому отводу тепла. Этот вариант охлаждения шликера позволяет получить керамический материал, однослойный на срезе, с однонаправленными порами в виде игл и необходимым размером пор. Четырехслойные образцы могут быть использованы в процессах, где необходима градиентная пористая керамика. При этом установлено, что такие образцы имеют слой из проницаемых однонаправленных пор, слой проницаемых разнонаправленных пор и переходный слой с нерегулируемой, частично закрытой пористостью.

Полученные результаты могут быть использованы для получения керамических фильтров для очистки различных отходящих газов в промышленности.

Библиографический список

1. *Studart, A. R.* Processing routes to macroporous ceramics : a review / A. R. Studart, U. T. Gonzenbach, E.

Tervoort [et al.] // J. Amer. Ceram. Soc. — 2006. — № 89 (6). — P. 1771–1789.

2. *Wegst, U. G. K.* Biomaterials by freeze casting / *U. G. K. Wegst, M. Schecter, A. E. Donius //* Philosophical Transactions of the Royal Society A: Physical, Mathematical and Engineering Sciences. — 2010. — Vol. 368, № 1917. — C. 2099–2121.

3. **Balachandran**, **U.** Dense cermet membranes for hydrogen separation / U. Balachandran, T. H. Lee, C. Y. Park // Separation and Purification Technology. — 2014. — Vol. 121. — P. 54–59.

4. *Chang, Q. B.* Effect of particle size distribution of raw powders on pore size distribution and bending strength of Al_2O_3 microfiltration membrane supports / *Q. B. Chang, Y. L. Yang, X. Z. Zhang* [et al.] // J. Europ. Ceram. Soc. — 2014. — Vol. 34, Nº 15. — P. 3819–3825.

5. *Liu, P. S.* Porous materials. Processing and application / *P. S. Liu, G. F. Chen.* — Elsevier, 2014. — 560 p.

6. *Aran, H. C.* Influence of geometrical and operational parameters on the performance of porous catalytic membrane reactors / *H. C. Aran, H. Klooster, J. M. Jani* [et al.] // Chem. Eng. J. — 2012. — Vol. 207. — P. 814–821.

7. **Cheraitia A.** Synthesis and characterization of microporous silica-alumina membranes / A. Cheraitia, A. Ayral, A. Julbe [et al.] // J. Porous Mater. — 2010. — Vol. 17, № 3. — P. 259–263.

8. *Araki, K.* Porous ceramic bodies with interconnected pore channels by a novel freeze casting technique / *K. Araki, J. W. Halloran //* J. Amer. Ceram. Soc. — 2005. — Vol. 88, N_{2} 5. — P. 1108–1114.

9. *Tang, Y. F.* Fabrication of lamellar porous alumina with axisymmetric structure by directional solidification with applied electric and magnetic fields / *Y. F. Tang, S. Qiu, Q. Wu, C. Miao* // J. Europ. Ceram. Soc. — 2016. — Vol. 36, № 5. — P. 1233–1240.

10. **Zhang, Y.** Freeze casting of aqueous alumina slurries with glycerol for porous ceramics / Y. Zhang, L. Hu, J. Han, Z. Jiang // Ceramics International. -2010. - Vol. 36, $\mathbb{N} \ge 2. - \mathbb{P}.$ 617–621.

11. **Tresvyatskii, S. G.** Grain size dependence of Strength of porous ceramic materials of Skeleton Structure / *S. G. Tresvyatskii, V. D. Tkachenko, E. P. Garmash* // Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov. — 1976. — Vol. 12. — P. 56–60.

12. **Song, H.-Y.** A novel method to fabricate porous hydroxyapatite body using ethanol bubbles in a viscous slurry / H.-Y. Song, S. Islam, B.-T. Lee // J. Amer. Ceram. Soc. -2008. - Vol. 91, Nº 9. - P. 3125-3127.

13. *Khattab, R. M.* Preparation and characterization of porous alumina ceramics through starch consolidation casting technique / *R. M. Khattab, M. M. S. Wahsh, N. M.*

Khalil // Ceramics International. — 2012. — Vol. 38, № 6. — C. 4723–4728.

14. **Zivcova-Vlckova**, **Z.** Microstructural comparison of porous oxide ceramics from the system Al_2O_3 - ZrO_2 prepared with starch as a pore-forming agent / *Z. Zivcova-Vlckova*, *J. Locs*, *M. Keuper* [et al.] // J. Europ. Ceram. Soc. - 2012. - Vol. 32, N 10. - P. 2163-2172.

15. **Mostafavi, E.** Destructive Interactions between pore forming agents and matrix phase during the fabrication process of porous BiFeO₃ Ceramics / *E. Mostafavi, A. Ataie* // J. Mater. Science & Technology. — 2015. — T. 31, \mathbb{N} 8. — C. 798–805.

16. **Pat. 3090094 US.** Method of manufacturing Porous Ceramic / Schwartzwalder K., Somers A. V. — 1963.

17. **Deng, Z.-Y.** High-surface-area alumina ceramics fabricated by the decomposition of $Al(OH)_3 / Z.-Y.$ Deng, T. Fukasawa, M. Ando [et al.] // J. Amer. Ceram. Soc. — 2001. — Nº 84. — P. 485–491.

18. **Studart, A. R.** Processing routes to macroporousceramics : a review / A. R. Studart, U. T. Gonzenbach, E. Tervoort [et al.] // J. Amer. Ceram. Soc. — 2006. — \mathbb{N} 89 (6). — P. 1771–1789.

19. *Harabi, A.* A new and economic approach to fabricate resistant porous membrane supports using kaolin and CaCO₃ / *A. Harabi, F. Zenikheri, B. Boudaira* [et al.] // J. Europ. Ceram. Soc. — 2014. — Vol. 34, № 5. — P. 1329–1340.

20. **Deville**, S. Freeze-casting of porous ceramics: A review of current achievements and issues / S. Deville // Advanced Engineering Materials. -2008. -Vol. 10, $N \otimes 3$. -P. 155–169.

21. *Qian, L.* Controlled freezing and freeze drying: a versatile route for porous and micro/nano-structured materials / *L. Qian, H. F. Zhang* // J. Chemical Technology and Biotechnology. — 2011. — Vol. 86, № 2. — P. 172–184.

22. *Cheraitia, A.* Synthesis and characterization of microporous silica-alumina membranes / *A. Cheraitia, A. Ayral, A. Julbe* [et al.] // J. Porous Mater. — 2010. — Vol. 17, № 3. — C. 259–263.

23. *Vijayan, S.* Dispersion and Setting of Powder Suspensions in Concentrated Aqueous Urea Solutions for the Preparation of Porous Alumina Ceramics with Aligned Pores / *S. Vijayan, R. Narasimman, K. Prabhakaran //* J. Amer. Ceram. Soc. — 2013. — Vol. 96, № 9. — P. 2779–2784.

24. **Кулиш, О. Н.** Перспективы развития технологии некаталитической очистки дымовых газов от очистки азота / О. Н. Кулиш, С. А. Кужеватов, Е. В. Бородина, Е. В. Куценко // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2005. — № 3. — С. 49–54.

> Получено 29.06.16 © К. С. Камышная, Т. А. Хабас, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



15-я научно-техническая конференция «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения»

Конференция состоится 10 ноября 2016 г. на ВВЦ,

павильон № 75, конференц-зал № 1. Начало работы: 10-00.

Контактная информация: Факс/телефон: (495)777-93-12 E-mail: omv@chermet.net Бокарева Юлия Владимировна