

Сведения о выполненных работах  
в период с 01.07.2018 г. по 30.06.2019 г.

по проекту **«Изучение физических закономерностей формирования структурно-фазового состояния и физико-механических свойств керамических материалов, полученных 3D печатью с применением высоконаполненных термореактивных и фотоотверждаемых суспензий»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 18-79-00153

Руководитель: канд. физ.-мат. наук Промахов Владимир Васильевич

В ходе выполнения первого этапа проекта разработана оригинальная конструкция 3D принтера для печати керамических образцов из термопластичных систем на основе наноструктурных порошков оксидов металлов. Оптимизированы рабочие параметры нового 3D принтера. Разработаны научные основы получения высоконаполненных суспензий на основе термореактивных (на основе парафина и воска) и фотополимерных связующих. Проведены исследования по изучению зависимости удельной поверхности порошков от температуры отжига.

Получены опытные образцы керамических материалов  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2(3\% Y_2O_3)$  и  $ZrO_2(Y_2O_3) + 20\% Al_2O_3$ . Выявлено, что прочность керамики  $ZrO_2(Y_2O_3) + 20\% Al_2O_3$  при статическом изгибе составила  $720 \pm 94$  МПа, микротвердость по Виккерсу  $HV = 20$  ГПа, модуль упругости  $E = 310 \pm 35$  ГПа. Для керамики на основе системы  $ZrO_2(4\% Y_2O_3)$  установлено, что прочность изгиб составила  $870 \pm 120$  МПа микротвердость по Виккерсу  $HV = 14$  ГПа, модуль упругости  $E = 280 \pm 55$  ГПа. Для керамики на основе  $Al_2O_3$  прочность изгиб составила  $350 \pm 74$  МПа, микротвердость по Виккерсу  $HV = 22$  ГПа, модуль упругости  $E = 343 \pm 40$  ГПа.

В ходе работы изучены закономерности формирования структуры, фазового состава и механических свойств керамических материалов, полученных с применением аддитивных технологий. Проведен анализ особенностей микроструктуры керамики. Показано, что при 3D печати образцов керамики с применением послойного наплавления керамических паст формируется несколько видов пор, которые характеризуются различной природой. Изучено механическое поведение образцов керамики с различной ориентацией слоев относительно оси нагружения. При сравнении диаграмм деформирования обнаруживается выраженная зависимость изменения механических свойств образцов от ориентации слоев. Установлена тенденция на снижение предела прочности на изгиб и повышение значений деформации при изгибе при сравнении средних значений изгибной прочности и деформации. Жесткость материала, характеризуемая модулем упругости при изгибе, уменьшается при изменении ориентации укладки слоев от параллельной к ортогональной направлению главной оси образца.

Результаты оценки механических свойств материалов, полученных с применением аддитивных технологий, свидетельствуют о необходимости учета

анизотропии параметров деформации и разрушения при разработке адекватных физико-математических моделей, способных предсказать поведение функциональных элементов конструкций из этих типов материалов.

Развиты модельные представления гетерогенных сред для описания процессов деформации, повреждения и разрушения керамических композиционных материалов при интенсивных динамических воздействиях. Выбор динамических подходов при нагружении обусловлен перспективным применением керамики в качестве защитных элементов для космических объектов и в средствах индивидуальной бронезащиты. Для моделирования процессов разрушения керамики, полученной по аддитивным технологиям, на следующем этапе выполнения проекта будут дополнительно проведены экспериментальные исследования параметров деформации и разрушения при динамическом нагружении. Полученные параметры лягут в основу верифицированной модели. Помимо основного плана исследований по проекту научной группой выполнена серия экспериментов по получению металлокерамических композиционных материалов с применением аддитивной технологии прямого лазерного выращивания. Взгляд в эту область исследований обусловлен тем, что с применением лазерных аддитивных технологий можно получать изделия за одну стадию. Однако в чистом виде керамические материалы получать с применением лазеров нельзя, как показали обзорные данные. В связи с этим актуальным является разработка металлокерамических композиционных материалов использование которых позволит применять лазерную технику и получать свойства изделий максимально приближенные к керамикам. Это новое направление для аддитивных технологий, которое весьма перспективно для многих областей промышленности, в частности, для ракетно-космической техники.

Результаты, полученные в ходе выполнения проекта, были представлены на следующих научных мероприятиях: 1) 3rd International Symposium Additive Manufacturing, January 29-31, 2019, Dresden, Germany; 2) V Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», 22.03.2019, Москва; 3) 2019 young Ceramists Additive Manufacturing Forum (yCAM) - 3 to 5 April 2019, Belgium; 4) XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», 23-26 апреля 2019 г., Томск.