

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2019 г. по 30.06.2020 г.

по проекту **«Изучение физических закономерностей формирования структурно-фазового состояния и физико-механических свойств керамических материалов, полученных 3D печатью с применением высоконаполненных терморезактивных 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 микро- и наноструктурных порошков оксидов металлов. Оптимизированы рабочие параметры нового 3D принтера. Разработаны научные основы получения суспензий на основе терморезактивных (на основе парафина и воска) и фотополимерных связующих. Проведены исследования по изучению зависимости удельной поверхности порошков от температуры отжига. Установлено, что вязкость полученных суспензий составила менее 5 Па•с, что является оптимальным для их использования в технологии лазерной стереолитографии. Получены опытные образцы керамических материалов Al_2O_3 , $ZrO_2(3\%Y_2O_3)$ и $ZrO_2(Y_2O_3) + 20\%Al_2O_3$. 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. Развита 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.

Регистрация профилей скорости свободной поверхности образцов керамик ZrO_2 и ZrO_2 с 20% добавкой Al_2O_3 в процессе ударного сжатия позволили определить динамический предел упругости (σ_{HEL}) и откольную прочность (σ_{sp}) исследуемых материалов. Измеренная величина σ_{HEL} для керамики ZrO_2 имеет ожидаемое (соответствующее плотности керамики) значение от 9.7 до 11.4 GPa, зависящее от толщины образцов. Регистрируемое значение σ_{HEL} для керамики ZrO_2 с 20% добавкой Al_2O_3 сильно зависит от плотности образцов и лежит в диапазоне от 5.5 до 9.3 GPa. Добавка оксида алюминия ожидаемо уменьшает плотность керамики на ~12 % и незначительно уменьшает значение σ_{HEL} . Образцы керамики ZrO_2 с 20% добавкой Al_2O_3 демонстрируют почти двукратное уменьшение откольной прочности при превышении динамического предела упругости. Величина откольной прочности керамики ZrO_2 слабо зависит от максимального значения давления ударного сжатия. Уменьшение откольной прочности при превышении динамического предела упругости для двух исследованных керамик, вероятно, связано с растрескиванием материала в пластической ударной волне.

Результаты моделирования показывают, что нелинейные эффекты механического поведения керамических композитов $ZrO_2-Al_2O_3$ с трансформационно-упрочненной матрицей, полученные аддитивными технологиями, проявляются при амплитудах ударного нагружения, близких или превышающих предел упругости Гюгониота σ_{HEL} . Нелинейные эффекты при интенсивных динамических воздействиях на рассматриваемые композиты связаны с процессами самоорганизации деформационных режимов на мезоскопическом уровне (формирование блочных подструктур), а также с возникновением мартенситных фазовых превращений в объемах матрицы, прилегающих к упрочняющим частицам. Наличие субмикронных армирующих частиц приводит к изменению формы локальной зоны повреждения, в то время как увеличение относительного количества поврежденных частиц можно определить как образование сдвиговых мезокрещин в объеме композита. Представленный в данной работе подход моделирования может быть использован для определения динамических характеристик керамических композитов до ударных нагрузок 1000 м/с.

В ходе выполнения исследования установлено, что с применением самораспространяющегося высокотемпературного синтеза возможно получение металлокерамических композиционных материалов с металлической матрицей и керамическими частицами с размером 0,5-5 мкм. Использование таких металлокерамических композиционных материалов эффективно при создании новых металломатричных композитов в процессе прямого лазерного выращивания.

Проведены комплексные аналитические исследования мировых трендов развития научных исследований в области аддитивных технологий. Как показал анализ мировых трендов, к настоящему времени тенденции развития аддитивных технологий таковы, что основной акцент смещается к разработкам новых материалов,

которые позволяют достигать высоких значений эксплуатационных свойств изделий, полученных на современных машинах 3D печати. Прежде всего, мировые научно-исследовательские центры и корпорации, работающие в области развития аддитивных технологий, делают акцент на новых композиционных материалах. Имеющиеся у авторского коллектива компетенции позволяют создавать ряд уникальных металломатричных композиционных материалов в виде порошков и проводить изучение структурно-фазового состояния новых материалов, полученных с применением лазерных технологий выращивания.

Полученные экспериментальные данные лягут в основу комплексных математических моделей, описывающих механику разрушения материалов, полученных с применением аддитивных технологий, для последующего прогнозирования поведения материалов в сложнагруженных условиях эксплуатации. Эти сведения нужны для оптимизации составов сложных сплавов и композитных материалов, режимов механической обработки материалов, а также для решения задач высокоскоростного удара и пробивания. Изучение механизмов разрушения полученных в проекте материалов будет проводиться с учетом подходов о многомасштабной, иерархически организованной структуре. Решение поставленных в проекте задач эволюции напряженно-деформированного состояния и многомасштабного разрушения в металлокерамических композиционных материалах с иерархической структурой будет иметь большое значение для многих смежных областей механики.