

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах в 2023 году

по проекту «**Физико-химические основы технологии высокоэнергетических  
материалов для аддитивной печати**»,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 23-29-00724

Руководитель: д-р физ.-мат. наук Жуков Александр Степанович

За первый год выполнения проекта проведен аналитический обзор в предметной области исследования. Проанализированы ключевые методы и составы, применяемые для 3D печати ВЭМ. Показано, что в литературе представлены различные технологические подходы 3D печати высокоэнергетических материалов, основанные на методах экструзии, струйной печати и стереолитографической 3D печати. Метод стереолитографической проекционной печати, выбранный для рассмотрения в рамках настоящего проекта, согласно результатам обзора, является одним из наиболее перспективных.

В качестве окислителей для получения высокоэнергетических композиций для 3D печати были рассмотрены перхлорат аммония в виде порошков двух фракций: ~50 мкм и 165-315 мкм, нитрат аммония ~100 мкм и их смесь в различном массовом соотношении. В качестве горючего компонента предварительно рассматривались порошки алюминия различной дисперсности: АСД-6, наноразмерный (Alex) и субмикронный порошок алюминия. Проведены расчеты композиций и массовых долей компонент, входящих в состав композиций. Проведены термодинамические расчетные исследования разрабатываемых высокоэнергетических композиций. Рассчитаны зависимость температуры, удельного импульса, газовой фазы и удельной доли конденсированных фаз от содержания алюминия в составе рассмотренных высокоэнергетических композиций, состав и содержание продуктов сгорания. Проведены исследования реологических характеристик высокоэнергетических суспензий для 3D печати в контексте установления зависимостей динамической вязкости от дисперсности, состава и содержания твердого порошкового наполнителя. Показано, что с увеличением содержания доли ПХА в составе суспензии с 30 до 70 масс. %, динамическая вязкость экспоненциально возрастает 19 до 960 Па\*с соответственно. Исследованы зависимости глубины отверждения монослоя разрабатываемых высокоэнергетических суспензий от времени экспозиции УФ-излучения. Проведены исследования влияния состава порошкового материала на механизмы полимеризации. Исследованы составы суспензий с добавлением нитрата аммония (НА) в различном соотношении. Исследовано влияние металлизированных добавок в виде алюминиевого порошка марки АСД-6. Выявлено, что на каждые 2 масс. % порошка АСД-6 глубина отверждения уменьшается на 30 мкм при одинаковом воздействии УФ-излучения.

С использованием методов сканирующей электронной микроскопии проведены исследования микроструктуры поперечного сечения полученных аддитивным

методом образцов ВЭМ. Проведен термический анализ отдельных компонентов и подготовленных высокоэнергетических композиций для 3D печати. Показано, что введение 3 масс. % порошка алюминия марки Alex в два раза увеличивает выделение тепла по сравнению с образцом с 3 масс. % АСД-6, а 3 масс. % субмикронного порошка алюминия – в 3 раза. По данным кривых ТГА/ДСК/ДТГ, полученные ВЭМ обладают высокой экзотермичностью. Система с нанодисперсным алюминием Alex превосходит систему с АСД-6 по энергетическим показателям практически в два раза. Высокая экзотермичность систем обусловлена взаимодействием окислителя с полимерами, металлическим порошком и/или их газовой фазой. Также термический анализ показал, что выбранные полимеры имеют достаточно высокие температуры плавления, что позволяет использовать их в качестве твердых компонент горючих систем.

Также в отчетный период с использованием метода масс-спектропии был проведен анализ продуктов реакции, выделяющихся в ходе термического разложения предлагаемых высокоэнергетических составов для 3D печати для образца полимеризованного материала на основе 30 масс. % полимера IF и порошка бидисперсного ПХА. Полученные результаты показали, что максимальное газовыделение приходится на экзотермические пик. При этом, фактический состав газовой фазы хорошо согласуется с рассчитанным с использованием программы «TERRA» продуктами газовой фазы. Так, в составе газовой фазы детектируется наличие паров HCl, азот, углекислый газ. Показано, что композиции не выделяют опасных паров хлора, являются стабильными.

В рамках выполнения первого года проекта по полученным научным результатам представлено 2 доклада, один из которых отмечен дипломом. Опубликовано 2 статьи: в журнале Polymer (Scopus, WoS, Q1), в журнале «Южно-Сибирский научный вестник» (ВАК); принята в печать статья в журнале «Технологии безопасности жизнедеятельности» (РИНЦ). Информация о реализации проекта была размещена в двух новостных источниках: на сайте ТГУ и на сайте РИА Томск.