

Сведения о выполненных работах  
в период с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 г.

по проекту **«Разработка научных основ получения высокопрочных  
металломатричных композиционных материалов с применением технологии  
прямого лазерного выращивания»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 20-79-10086

Руководитель: Промахов Владимир Васильевич, канд. техн. наук

1. Методом СВС проведен синтез порошковых компонентов CrN и TiNi. Установлено, что температура реакции экзотермической реакции компонентов смеси несколько выше в образцах большего размера и массы, что связано с повышением поверхности реагирования компонентов. С применением прямого лазерного выращивания получены образцы композиционных материалов системы Inconel 625–TiN. Установлено, что элементы титана, хрома, никеля, алюминия и карбона имеют высокую концентрацию в области, содержащей частицы CrNi–TiN, тогда как железо распределяется равномерно по всей поверхности образца. Установлено наличие включений частиц CrNi–TiN в матрице Inconel 625.

2. Концентрация СВС-частиц в исходной смеси оказывает существенное влияние на свойства получаемых композитов. При низкой концентрации (5 масс. %) частицы равномерно распределены в матрице и образуют композит с хорошими механическими свойствами. Однако, увеличение концентрации СВС-частиц до 90 масс. % приводит к образованию крупных агломератов керамических включений и снижению качества получаемых композитов. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и оптимизации процессов получения аддитивных композитов на основе порошковых смесей. Прямое лазерное выращивание из порошковой смеси Inconel 625 – TiN и Inconel 625 – CrNi – TiN позволяет получать материалы прямоугольной формы с равномерным построением слоев оболочки без ярко выраженных дефектов. Рентгенофазовый анализ показывает, что все композиционные материалы содержат фазы Ni и TiN, а с увеличением массовой концентрации частиц CrNi – TiN в исходной смеси происходит увеличение фазы нитрида титана и уменьшение никелевой фазы. Параметры решетки всех обнаруженных фаз близки к теоретическим. Размер области когерентного рассеяния материалов характеризует размер кристаллитов в материалах, и его увеличение связано с повышением концентрации частиц CrNi – TiN в исходной смеси. РЕМ-изображения структур образцов композиционных материалов показывают, что керамические включения TiN распределены неравномерно, и их размер изменяется с увеличением доли частиц CrNi - TiN в исходной смеси.

. Установлено, что увеличение концентрации CrNi – TiN в исходной смеси от 0 до 30 масс. % приводит к росту предела прочности от 830 до 940 МПа, однако, дальнейшее повышение концентрации частиц до 90 масс. % приводит к снижению

предела прочности до 380 МПа. Увеличение предела прочности при растяжении композиционных материалов связано с механизмом гетерофазного армирования металлической матрицы керамическими включениями и уменьшением среднего размера матричного зерна. Однако, дальнейшее повышение доли СВС-частиц в исходной смеси до 90 масс. % приводит возникновению внутренних напряжений и образованию трещин и дефектов, снижающих показатель прочности композитов. Оптимальной концентрацией композиционных СВС-частиц CrNi – TiN в исходной порошковой смеси является 5 масс. %, при которой структура материалов имеет равномерное распределение обособленных частиц нитрида титана в матричном материале без образования их агломератов и не обнаружено дефектов и пор. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальный состав материалов для проведения высокотемпературных испытаний на трехточечный изгиб.

4. В результате проведенных испытаний на трехточечный изгиб было выявлено, что добавление 5 масс. % СВС-частиц CrNi – TiN в порошковую смесь Inconel 625 приводит к увеличению предела прочности образцов, как при комнатной температуре, так и при повышенных (1000°C) температурах. При этом наблюдается снижение деформации композиционных материалов относительно образцов из чистого Inconel 625. Увеличение предела прочности связано с механизмами гетерофазного армирования и измельчения зерен матричного материала за счет частиц нитрида титана, выступающих в качестве центров их кристаллизации.

5. При воздействии ударных волн на композиты Inconel 625 – TiN происходит интенсивная многолокальная пластическая деформация, провоцирующая образование микротрещин, которые могут привести к общей разрушаемости материала. Было показано, что при росте давления в области фронта ударной волны возрастает максимальное значение пластической деформации и общее значение эффективного упругого модуля сдвига. При этом при увеличении температуры наблюдается снижение модуля сдвига, что необходимо учитывать при разработке композитных материалов для применения в условиях высоких температур. Использование математических моделей и численных методов позволяет получить более точные прогнозы поведения композитных материалов при различных динамических воздействиях и оптимизировать их свойства для конкретных применений.

6. Установлено, что максимальные работы на разрушение для металломатричных композитов достигаются при содержании упрочняющих частиц в размере 15 %. Выявлено, что развитие пластического течения в металлической матрице обеспечивает частичный перенос кинетической энергии частиц на упрочняющие частицы, что приводит к формированию зон локальных повреждений керамических включений в зоне ударного перехода. Микроповреждения локализованы на мезоскопическом уровне в местах расположения армирующих керамических частиц. При увеличении времени гидростатического сжатия фронтом ударной волны не обнаружено существенного изменения размеров и конфигурации зон локальных повреждений.