

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах  
в период с 01.07.2023 г. по 30.06.2024 г.

по проекту **«Разработка методики компьютерного моделирования деформации и разрушения титановых сплавов в условиях динамических воздействий с целью создания конструкций транспортных систем и энергетического оборудования»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-79-00162

Руководитель: Скрипняк Владимир Владимирович, канд. физ.-мат. наук

В отчетный период в рамках проекта были выполнены следующие работы:

1. Подготовлены и проведены экспериментальные испытания блочных образцов сплавов ВТ1-0 с надрезами при высокоскоростном трехточечном изгибе для исследования закономерностей сопротивления пластическому течению в сложном напряженном состоянии при комнатной и пониженной температурах.

Две серии образцов сплава ВТ1-0 были вырезаны электроэрозионным методом на установке DK7732 CNC machine из пластины 10 мм толщины вдоль и поперек направления проката. Образцы имели призматическую форму с размерами 10x55x10 мм и надрезом на расстоянии от торцевых граней 27.5 мм глубиной 2 мм и углом между поверхностями надреза 45° С. Испытания образцов с надрезом альфа-титанового сплава ВТ1-0 при трехточечном изгибе при скоростях движения опорного устройства 0,5; 1; 5; 10 м/с при температуре 25 ±2° С были выполнены на сервогидравлическом стенде INSTRON VHS 40/50-20. Были выполнены испытания двух серий образцов. Для каждой скорости движения опорного устройства были испытаны по 3 образца из каждой серии.

2. Подготовлены и проведены экспериментальные испытания блочных образцов сплава ВТ5-1 с надрезами при высокоскоростном трехточечном изгибе при температуре 295 К (25 ±2° С). Образцы были вырезаны электроэрозионным методом из объема круглого проката диаметром 85 мм на установке DK7732 CNC machine с ориентацией длинных граней вдоль оси симметрии круглого проката. Испытания образцов при трехточечном изгибе при скоростях движения опорного устройства 0,5; 1; 5; 10 м/с были выполнены на сервогидравлическом испытательном стенде INSTRON VHS 40/50-20 в режиме испытаний с поддержанием постоянной скорости движения опорного устройства с точностью ~1-2 %. Для каждой скорости движения опорного устройства были испытаны по 3 образца.

3. Подготовлены и проведены испытания на стенде INSTRON VHS 40/50-20 образцы с надрезом сплава ВТ1-0 при трехточечном изгибе при скоростях перемещения опорного устройства 0,5; 1; 5; 10 м/с при начальной температуре 223 К. Охлаждение образцов осуществлялось путем погружения в среду сухого льда и выдержке до 50 мин для достижения равномерного распределения температуры. Температура измерялась двумя независимыми методами: путем контактного измерения температуры цифровым термометром ТМ902С и бесконтактным методом с использованием инфракрасного пирометра (термодетектора) марки TESLA IT600 с

точностью  $+2^{\circ}$  С. Для каждой скорости были испытаны по 3 образца из каждой серии, которые были вырезаны вдоль и поперек направления проката.

4. Подготовлены и проведены испытания на стенде INSTRON VHS 40/50-20 образцы сплава BT5-1 с V-образным надрезом при трехточечном изгибе при скоростях перемещения опорного устройства 0,5; 1; 5; 10 м/с при температуре 223 К. Проведен анализ полученных результатов, определены параметры KCV, оценка энергии разрушения образцов.

5. Разработана вычислительная модель для имитационного численного моделирования процесса деформации, повреждения и вязкого разрушения образцов титановых сплавов при трехточечном изгибе. Для численного моделирования на основе вычислительной модели использован решатель LS DYNA, включенный в состав лицензионного программного обеспечения WB ANSYS 19.2.

6. Проведено имитационное численное моделирование процесса деформации, повреждения и вязкого разрушения образцов титановых сплавов с V-образным надрезом при трехточечном изгибе при комнатной температуре.

7. Проведено имитационное численное моделирование процесса деформации, повреждения и вязкого разрушения образцов титановых сплавов с V-образным надрезом при трехточечном изгибе при температуре 223 К ( $-50^{\circ}$  С).

8. Подготовлена документация для регистрации программы в государственном реестре. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

Определение компонент тензора напряжения при приведении на поверхность текучести среды с учетом нелинейного деформационного упрочнения среды, деформационной анизотропии, скоростной чувствительности напряжения течения, температуры и поврежденности. Программный модуль может использоваться в качестве пользовательского модуля UMAT43 совместно с пакетом LS DYNA при решении динамических задач при интенсивных воздействиях с амплитудами до 10.1 ГПа на поликристаллические титановые сплавы с заданными размерами зерна.

В результате выполнения исследований в отчетный период получены следующие научные результаты:

1. Получены новые экспериментальные результаты об изменении усилий и перемещений при трехточечном изгибе образцов с надрезом титановых сплавов BT1-0, BT5-1 при скоростях опорного устройства с образцом 0,5, 1, 5, 10 м/с при температуре 298 К. Определены закономерности изменения во времени усилия при трехточечном изгибе образцов с надрезом на стадии до начала роста магистральной трещины, а также на стадии роста трещины. Полученные данные о прогибах образцов и энергии роста трещины во времени, полученные при регистрации с высоким временным разрешением.

Полученные результаты свидетельствуют о снижении энергии разрушения образцов, вырезанных поперек направления проката, по сравнению с энергией разрушения образцов, вырезанных вдоль направления проката. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии текстуры, формирующейся при прокате

альфа-титановых сплавов, на стадийность и общие закономерности роста трещины в условиях высокоскоростной деформации.

2. Получены новые экспериментальные результаты об удельной вязкости разрушения и изменении во времени усилий и прогибов призматических образцов титановых сплавов BT1-0, BT5-1 с V образным надрезом при трехточечном изгибе, при скоростях опорного устройства с образцом 0,5, 1, 5, 10 м/с и начальной температуре 223 К. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о снижении энергии разрушения сплавов BT1-0, BT5-1 при снижении начальной температуры с 298 К до 223 К. Установлено, что характер разрушения альфа-титановых сплавов при снижении температуры до 223 К. С остается вязким.

3. Разработана методика численного имитационного моделирования процесса деформации, повреждения и вязкого разрушения образцов титановых сплавов с V-образной трещиной при высокоскоростном трехточечном изгибе. Методика численного моделирования в трехмерной постановке процессов деформации и разрушения образцов с надрезами при динамическом изгибе может быть использована в среде LS DYNA. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния, зарождения и роста трещины реализован в оригинальном программном модуле UMAT.

#### Возможность практического использования результатов

В рамках проекта были получены новые дефицитные данные о закономерностях высокоскоростной деформации и динамического разрушения альфа-титановых сплавов в диапазоне температур от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $25^{\circ}\text{C}$ . Полученные данные были использованы для установления адекватности и точности результатов моделирования с использованием разработанной модели для описания пластического течения, повреждаемости и прочности титановых сплавов. Совокупность полученных результатов позволяет повысить адекватность прогнозов прочностного анализа при проектировании ответственных элементов конструкций в условиях сложного напряженного состояния и динамических нагрузок. Результаты могут быть использованы при проектировании и усовершенствовании ответственных элементов конструкций в производимой отечественной авиационной технике, водного и подводного транспорта, а также энергетического и химического оборудования. Полученные при выполнении проекта данные о механическом поведении титановых сплавов в условиях динамического нагружения и сложного напряженного состояния могут быть использованы при проектировании конкурентоспособной продукции нового поколения и позволят оптимизировать конструкции отечественных транспортных систем и технологии их производства, сократить избыточные объемы дорогостоящих сплавов в продукции. Практическое использование разработанной модели при компьютерном моделировании в цифровых технологиях проектирования сложных транспортных и энергетических систем обеспечит повышение качества проектов, сокращение затрат и сроков проведения опытно-конструкторских работ по совершенствованию продукции.

Полученные при выполнении проекта результаты ориентированы на использование их в критически важном для Российской Федерации переходе к

передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, новым материалам и способам конструирования.

Полученные результаты проекта будут иметь значимый экономический эффект при их использовании и будут способствовать повышению конкурентоспособности Российской технической продукции на мировом рынке. Важный социальный эффект использования результатов проекта связан с вовлечением нового поколения молодых специалистов в области «Прикладной механики» в сферу новых цифровых технологий проектирования и производства продукции. Результаты проекта будут использованы при подготовке магистрантов и аспирантов в Томском государственном университете в интересах Объединенной авиастроительной корпорации (ОАК), Роскосмоса и ряда других госкорпораций РФ. Результаты проекта использованы при подготовке кандидатской диссертации исполнителя проекта аспиранта К.В. Иохим.