



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ АЛЮМОМАТРИЧНОГО
КОМПОЗИТА ALSI10MG-AL₂O₃,
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО
ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

В. П. Алексеев, к-т техн. наук,
А. И. Хаймович, д-р техн. наук,
И. С. Степаненко,
А. Г. Колмаков, акад. РАН

Самара, 2025



Целью работы является прогноз (оценка) механических свойств композиционного материала, в частности ММК, исходя из известных свойств матрицы как отдельной фазы и свойств дискретных компонентов, образующие распределенные по объему матрицы армирующие фазы.

Задачи:

- Провести сравнительный анализ аналитических методов моделирования (Мори-Танака и двойного включения);
- Определить механические свойства материала матрицы $AlSi10Mg$ и армирующей фазы Al_2O_3
- Применить методы вычислительной микромеханики для моделирования представительного объема;
- Оценить влияние особенностей армирования на напряженно-деформированное состояние;
- Разработать комплексный подход к моделированию с использованием разных технологий на различных этапах.



- Металломатричные композиционные материалы на основе алюминия широко применяются в авиационной, автомобильной и оборонной промышленности;
- Аддитивные технологии, в частности селективное лазерное плавление, предоставляют новые возможности получения алюмоматричных композитов (АМК);
- Необходимость разработки методики оценки механических свойств АМК в зависимости от параметров микроструктуры при СЛС;
- Существующие частные подходы для моделирования механических свойств недостаточно эффективны;





Оборудование и материалы:

- Установка селективного лазерного сплавления SLM 280HL.
- Порошок AlSi10Mg (средний размер фракции 50 мкм)
- Порошок оксида алюминия Al₂O₃ (корунд, средний размер 26.6 μm)
- Соотношение компонентов 1:1

Изготовление образцов осуществляли в среде инертного газа (аргон). Механические свойства образцов исследовали по ГОСТ 1497-84 на универсальной испытательной машине модели INSTRON 8802.



Параметры СЛС для матрицы AlSi10Mg:

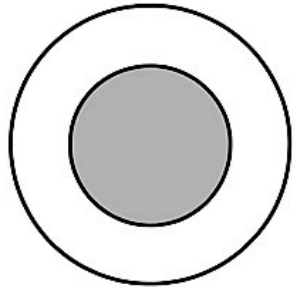
- Мощность лазера: 350 Вт
- Скорость сканирования: 980 мм/с
- Шаг сканирования: 0,19 мм
- Толщина слоя: 50 мкм

Механические свойства составляющих фаз

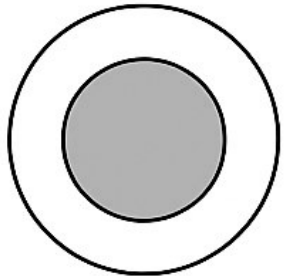
Материал	Модуль Юнга, ГПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
AlSi10Mg (матрица)	70	300-350	6-8
Al ₂ O ₃ (армирование)	380	300-400	0,1-0,2



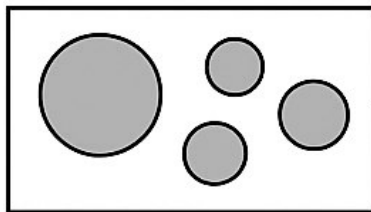
Аналитические методы



→ Метод
Мори-Танака



→ Метод двойного
включения

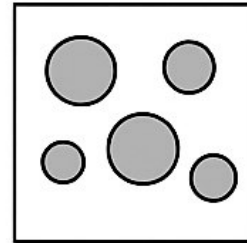


→ Гомогенизация
среднего поля
(MF-Digimat)

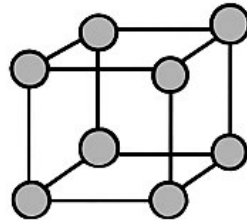
Методы вычислительной микромеханики



Моделирование
ячейки представи
тельного объема (RVE)



Алгоритм случайной
последовательной
адсорбции (RSA)



Метод конечных
элементов (Digimat-FE)



РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ДВОЙНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

- Сравнение показывает влияние содержания армирующей фазы на механические характеристики;
- Увеличение доли включений с 20% до 50% приводит к увеличению предела прочности на 25%;
- Область упруго-пластичности уменьшается на 15-18%;

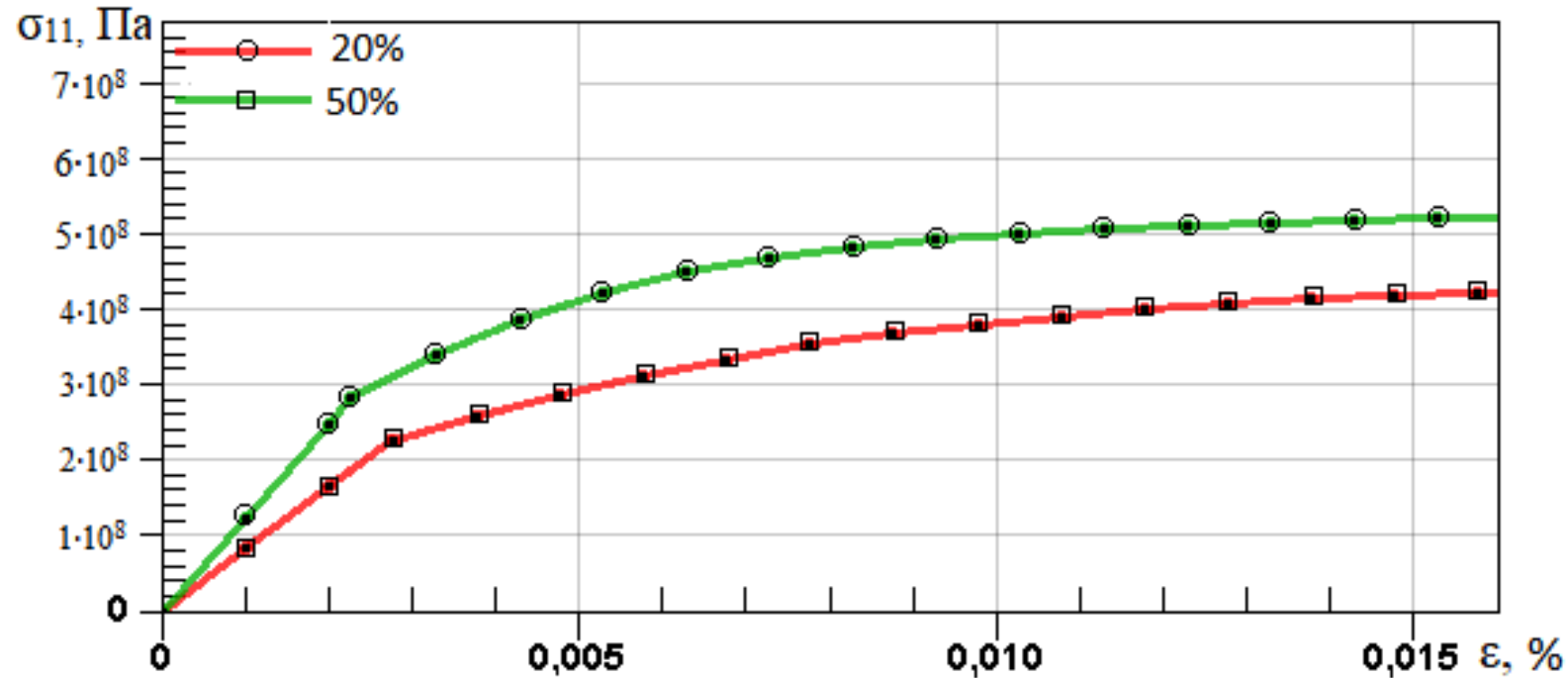


График напряжение-деформация для композита с различной массовой долей керамических включений



Этапы моделирования:

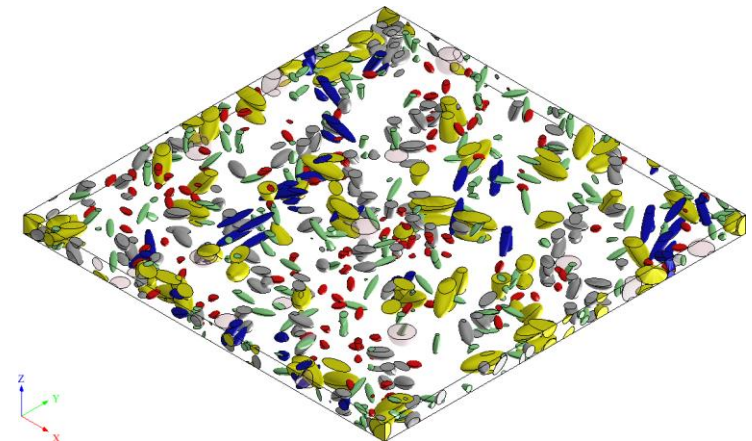
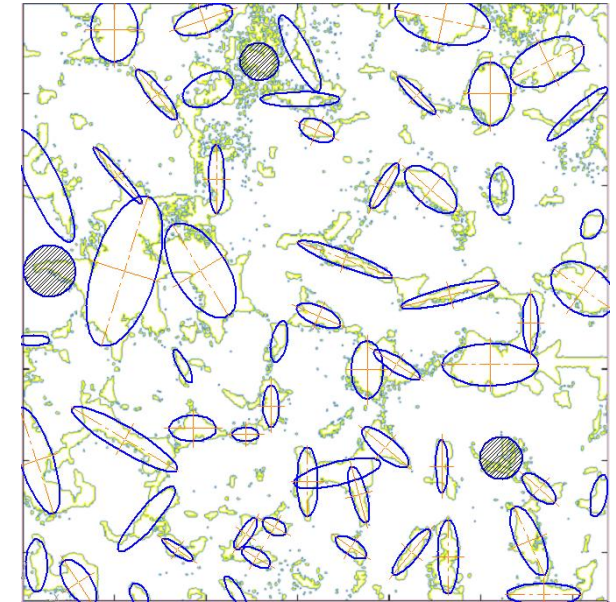
1. Моделирование представительного объема
2. Определение физических характеристик составляющих фаз
3. Назначение граничных условий
4. Гомогенизация свойств и обработка результатов

Исходные данные композита AlSi10Mg-Al₂O₃:

- Пропорция смешивания порошков 1:1
- Размер частиц Al₂O₃: 26,6 мкм
- Размер частиц AlSi10Mg: 33,1 мкм

Процедура оценки распределения армирования в матрице:

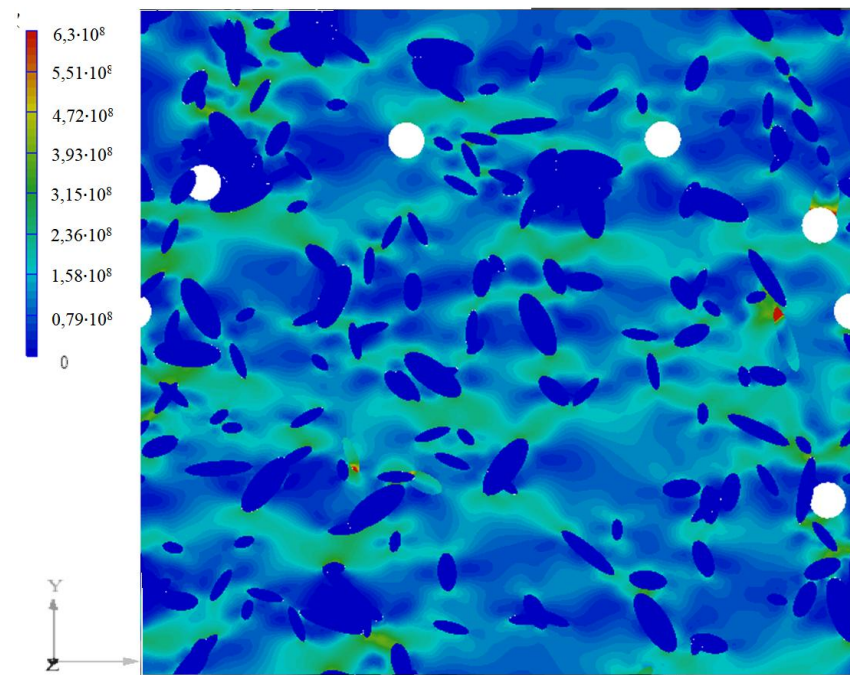
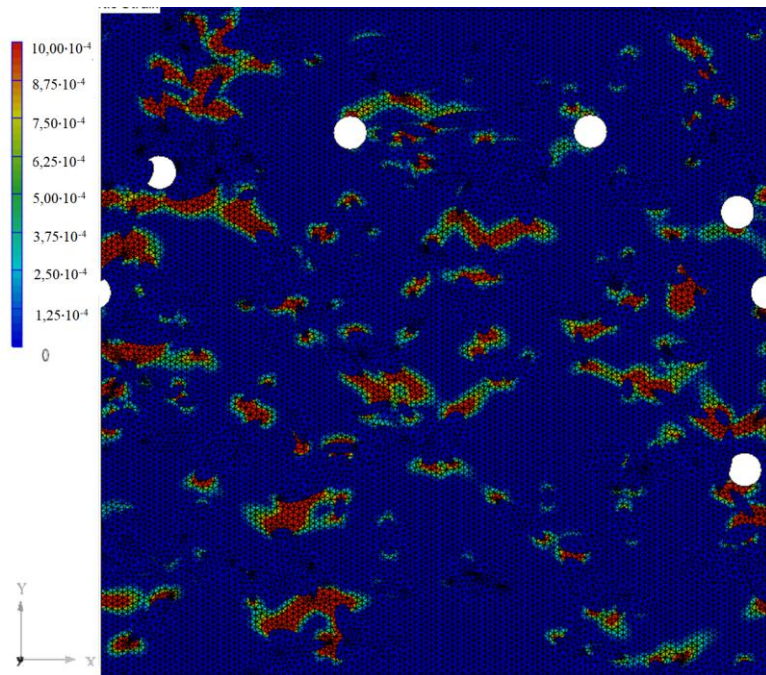
- Бинаризация микроструктуры (алгоритм Флойда-Стенберга)
- Векторизация и аппроксимация эллипсами
- Кластеризация размеров методом k-средних





РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

- Сетка конечных элементов: 33236 треугольных элементов, 19922 узловые точки
- Включения корунда вызывают неравномерность напряженно-деформированного состояния до 350%
- Критические напряжения возникают в области интерфейса включений с матрицей
- Вероятность образования микротрещин при среднем напряжении ~ 300 МПа



Метод Мори-Танака:

- Хорошая сходимость при содержании армирующей фазы 25-30%
- Плохая сходимость в пластической области

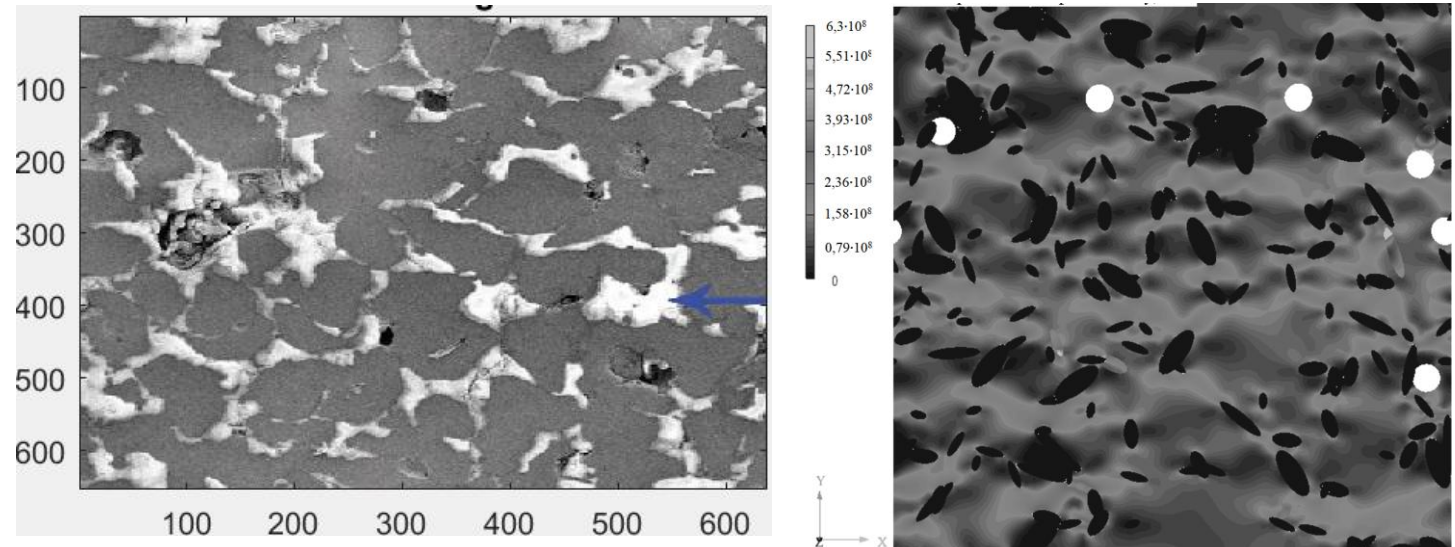
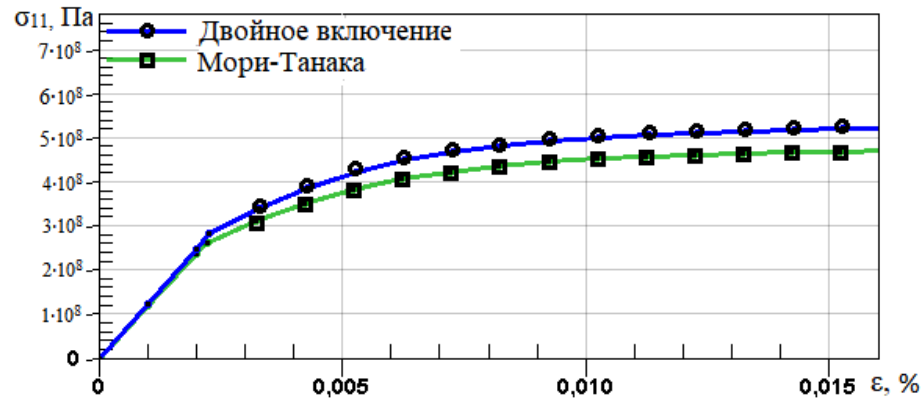
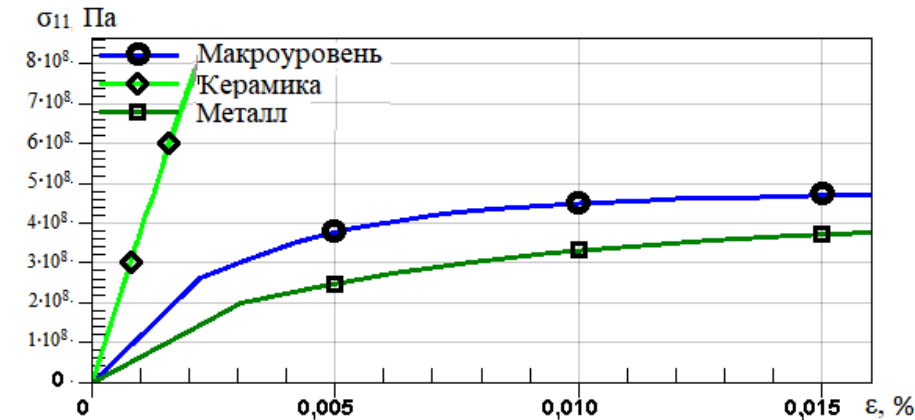
Метод двойного включения:

- Более точная оценка по сравнению с Мори-Танака
- Более высокая оценка предела прочности

Сравнительный анализ точности аналитических методов моделирования Мори-Танака и двойного включения на примере композита AlSi10Mg-Al₂O₃ для построения кривой нагружения показал, что метод двойного включения обеспечивает более точный результат. Средние величины эквивалентных напряжений, полученных методом микромеханики, в большей степени соответствуют их оценке методом двойного включения

Вычислительная микромеханика:

- Учет реальной морфологии частиц
- Неравномерность напряжённо-деформированного состояния до 350%
- Выявление критических областей взаимодействия фаз





1. На примере полученного методом селективного лазерного сплавления композита AlSi10Mg-Al₂O₃ показано, что использование отдельно взятых существующих подходов для моделирования механических свойств алюмоматричного композиционного материала не является полностью эффективным.
2. Предложен комплексный подход к моделированию механических свойств алюмоматричных композитов, использующий разные технологии моделирования на разных этапах:
 - предварительный анализ с использованием аналитического метода двойного включения для ориентировочной подборки пропорции армирующей фазы и укрупненной оценки влияния доли армирующих включений на механические характеристики;
 - уточняющий анализ с применением методов вычислительной микромеханики (моделирование представительского объема по технологии алгоритма случайной последовательной адсорбции RSA с последующим нагружением сетки конечных элементов) для оценки влияния особенностей армирования на напряжено-деформированное состояние;
 - анализ серии натуральных экспериментов и испытаний на прочность для отработки технологических режимов синтеза алюмоматричного композита и получения реальных данных по его механическим свойствам и микроструктуре;
 - апостериорный анализ с использованием методов вычислительной микромеханики по данным экспериментов для разработки адекватного цифрового двойника материала.



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

**БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ**