

## Идентификация параметров уравнения состояния Бэкофена на основе данных механических испытаний с применением методов машинного обучения

Научный руководитель – Аксенов Сергей Алексеевич

Котюшенко М.Н.<sup>1</sup>, Миколаенко В.В.<sup>2</sup>

1 - Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова, Москва, Россия, *E-mail*: *mnkotyushenko@yandex.ru*; 2 - Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова, Москва, Россия, *E-mail*: *vmikolaenko@hse.ru*

Определение параметров материала по экспериментальным кривым «напряжение–деформация» является важной задачей механики деформируемого твёрдого тела и численного моделирования. Надёжная идентификация таких параметров необходима для построения адекватных моделей материала, программирования расчётов и выбора режимов процессов формовки. Однако стандартные одноосные испытания не всегда позволяют напрямую восстановить истинные свойства материала, поскольку на получаемые кривые влияют неоднородность деформации, перетекание материала из захватной зоны и особенности стандартной процедуры обработки результатов. Эта проблема подробно обсуждается в работе [1].

Одним из подходов к её решению является итерационная процедура идентификации параметров модели материала, основанная на совместном использовании экспериментальных данных и конечно-элементного моделирования. Такой подход позволяет уточнять модель по результатам последовательных расчётов, но требует серии моделирований и потому является вычислительно затратным [2].

В данной работе рассматривается альтернативный подход к определению параметров материала по данным одноосных испытаний при различных постоянных скоростях деформации. Для первичной проверки работоспособности метода выбрана модель Бэкофена. На первом этапе выполняется серия вычислительных экспериментов, моделирующих одноосное растяжение при различных комбинациях параметров материала. По результатам расчётов формируется синтетический датасет, содержащий набор кривых «напряжение–деформация» для нескольких значений скорости деформации. Далее задача обратного анализа формулируется как задача регрессии: по форме и взаимному расположению серии кривых требуется определить параметры материала.

Апробировано несколько моделей машинного обучения: градиентный бустинг, дерево решений и многослойный перцептрон, обучаемые на признаках, извлечённых из кривых деформирования. Дополнительно реализован подход «картинка в картинку» на основе сверточной нейронной сети: входные данные представлялись в виде тензора, где каналы соответствовали полям деформации, скорости деформации и напряжения. Выполнено сравнение точности восстановления параметров для различных моделей.

Результаты показали возможность применения методов машинного обучения, включая сверточные нейронные сети, для определения параметров модели материала по кривым «напряжение–деформация». Полученные выводы подтверждают работоспособность подхода на модели Бэкофена и позволяют перейти к исследованию более сложных соотношений.

### Источники и литература

- 1) Aksenov S., Mikolaenko V. The effect of material properties on the accuracy of superplastic tensile test //Metals. – 2020. – Т. 10. – №. 10. – С. 1353.

- 2) Aksenov S., Mikolaenko V. Accurate determination of uniaxial flow behaviour of superplastic materials //European Journal of Mechanics-A/Solids. – 2025. – Т. 109. – С. 105469.