

# ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ ХОЛОДНОКАТАННОЙ И ОТОЖЖЕННОЙ МЕДИ М1Т НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ, ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

*Е. С. Родионов, А. Е. Майер, В. В. Погорелко, А. Я. Черепанов, В. Г. Лупанов, П. Н. Майер*

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Для разработки инженерных приложений необходимо опираться на теоретические модели поведения материала при динамических и квазистатических нагрузках. Современный прогресс в развитии моделей пластичности, учитывая рост вычислительных мощностей, позволяет рассматривать исследуемый материал в широком диапазоне скоростей деформации и экспериментальных схем (тест Тейлора, плоское соударение пластин, разрывные машины и т. д.). Параметризация теоретических моделей для конкретного металла или сплава позволит лучше соответствовать инженерной практике. Представлен комбинированный экспериментально – теоретический подход для определения параметров модели и исследования динамической пластичности металлов с использованием современных методов машинного обучения. Представленный подход позволяет в короткие сроки идентифицировать параметры модели для исследуемого металла.

На сегодняшний день существует большое количество экспериментальных методик для исследования поведения металлов при динамическом нагружении. Среди них можно отметить эксперименты о плоском соударении пластин, разрезные стержни т.д. Однако варьирование широких диапазонов скоростей деформации для таких экспериментов невозможно. В работе предложено проведение эксперимента о соударении твердого шара с преградой, в котором возможна широкая реализация скоростей деформации до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , что сопоставимо с экспериментами о плоском соударении пластин. Для метания ударников используется газовая пушка. Ударник представляет собой шарики, диаметрами 4 и 10 мм из карбида вольфрама, мишень – медная пластина марки М1, толщиной 5 мм.

В численной части модель дислокационной пластичности с учетом кинетики дислокаций, дополненная подмоделью изменения размера зерна и роста пор реализована в трехмерном случае с использованием численной схемы гидродинамики сглаженных частиц (SPH) [1]. Ранее эта модель была проверена для задачи о структуре ударной волны при соударении пластин [2]. Модель была параметризована для случая медных цилиндрических ударников [3]. Для существенного ускорения процесса параметризации предлагается использовать современные методы машинного обучения. Работа модели эмулируется с помощью ИНС (искусственной нейронной сети). ИНС обучается с помощью базы данных, в которой собраны результаты расчетов модели дислокационной пластичности. Параметризация модели выполнена с помощью статистического метода Байеса. В настоящей работе предложен дополненный, по сравнению с [3], подход к параметризации модели, позволяющий увеличить количество идентифицируемых параметров модели, а также более подробным сравнением геометрических профилей образцов. Для идентификации модели изменения размера зерна и роста пор был проведен микроструктурный анализ методами оптической микроскопии для холоднокатанных и отожженных пластин.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (проект № 24-71-00080, [rscf.ru/project/24-71-00080](https://rscf.ru/project/24-71-00080)).

## Литература

1. **Rodionov, E. S.** Taylor impact tests with copper cylinders: Experiments, microstructural analysis and 3D SPH modeling with dislocation plasticity and MD-informed artificial neural network as equation of state [Text] / E. S. Rodionov, V. G. Lupanov, N. A. Gracheva, et al. // *Metals*. – 2022. – Vol. 12. – P. 264. <https://doi.org/10.3390/met12020264>.
2. **Mayer, A. E.** Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading [Text] / A. E. Mayer, K. V. Khishchenko, P. R. Levashov, P. N. Mayer // *J. Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 113, No. 19. – P. 93508. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4805713>.

3. **Rodionov, E. S.** Modified Taylor impact tests with profiled copper cylinders: experiment and optimization of dislocation plasticity model [Text] / E. S. Rodionov, V. V. Pogorelko, V. G. Lupanov, et al. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – P. 5602. <https://doi.org/10.3390/ma16165602>.

---