

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И РАСПЛАВОВ

**П.Н. Майер**

к.ф.-м.н., доцент кафедры общей и теоретической физики  
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск, Россия

[polina.nik@mail.ru](mailto:polina.nik@mail.ru)

<https://www.researchgate.net/profile/Polina-Mayer>

Разрушение металлов при высокоскоростной деформации имеет существенное значение для ряда практически важных приложений, включая целостность различных изделий и конструкций при динамических воздействиях, а также задачи высокоскоростной обработки металлов резанием и лазерной ударной проковкой. В докладе представлен блок работ по построению теоретических моделей процесса динамического разрушения, как твердых металлов, так и расплавов.

Большой блок работ посвящен исследованию методом молекулярной динамики (МД) процессов разрушения на атомарном уровне [1-7], включая расчет откольной прочности [1], исследование поздних стадий растяжения, когда расплав превращается в пену [2,3], исследование статистики ансамбля полостей [3,4], событий нуклеации, коллапса и коалесценции полостей [5], а также влияния включений и других неоднородностей [6,7]. В частности показано, что на этапе нуклеации полостей их размеры описываются экспоненциальным распределением, а после частичной релаксации напряжений и схлопывания самых мелких полостей, ставших подкритическими, распределение трансформируется в нормальное [3,4]. Показано, что сам по себе растворенный водород не оказывает существенного влияния на откольную прочность, но его выделения в виде пузырьков существенно ее снижают [6]. МД моделирование позволяет непосредственно исследовать только сверхвысокие скорости деформации, экспериментально достижимые при облучении тонких фольг фемтосекундными лазерными импульсами. С другой стороны, наличие таких экспериментальных данных позволяет верифицировать результаты МД моделирования. Примечательно, что экспериментальные данные свидетельствуют о вполне ненулевой откольной прочности расплавов, что делает актуальным разработку соответствующих теоретических моделей, а МД моделирование показывает, что ставшие пеной растянутые расплавы еще долго продолжают сопротивляться дальнейшему растяжению [2,3].

Для описания в рамках механики сплошной среды разрушения при соударении [8] или интенсивном облучении [1] требуется разработка теоретических моделей разрушения. Физически обоснованным подходом является описание разрушения через эволюцию ансамбля полостей, т.е. их нуклеацию/активацию и рост, а также вызванную этим ростом релаксацию растягивающих напряжений. Построенная таким образом модель позволяет воспроизвести данные МД не только в части эволюции напряжений, но и в части концентрации пор и распределения пор по размерам [9]. Учет начальных дефектов (несмачиваемых включений) позволяет расширить область применимости модели на умеренные скорости деформации и воспроизвести скоростные зависимости откольной прочности в широком диапазоне скоростей деформации [10,11]. При умеренных скоростях деформации основным механизмом инициирования разрушения является активация полостей на существующих дефектах, а при сверхвысоких скоростях деформации происходит переход к гомогенной нуклеации полостей. Показана связь начального спектра дефектов со скоростной зависимостью откольной прочности [11]. Построена модель поздних стадий расширения расплава, превратившегося в пену [3].

Практически важным случаем является динамическое разрушение при совместном действии сдвиговых и растягивающих напряжений, как это имеет место при

высокоскоростном соударении в тестах Тейлора [12]. МД моделирование сдвиговой деформации предварительно растянутых образцов показало, что пластическая деформация может их дестабилизировать и инициировать развитие пористости. Для описания этого процесса предложена модель каскада энергии [12]: часть пластически диссипируемой энергии тратится на образование дефектов и затравочной пористости, которая далее может механически расти под действием растягивающих напряжений, что и приводит к разрушению. Модель верифицирована по данным МД и далее перенесена на макроскопический уровень (3D моделирование методом SPH), что позволило описать результаты экспериментов по разрушению латунных образцов в тестах Тейлора.

### Список публикаций

- [1] Mayer A.E., Mayer P.N. Continuum model of tensile fracture of metal melts and its application to a problem of high-current electron irradiation of metals // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – V. 118 (3) – P. 035903. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4926861>.
- [2] Mayer P.N., Mayer A.E. Late stages of high rate tension of aluminum melt: Molecular dynamic simulation // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – V. 120 (7) – P. 075901. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4959819>.
- [3] Mayer P.N., Mayer A.E. Evolution of foamed aluminum melt at high rate tension: A mechanical model based on atomistic simulations // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – V. 124(3). – P. 035901. <https://doi.org/10.1063/1.5039604>.
- [4] Mayer P.N., Mayer A.E. Size distribution of pores in metal melts at non-equilibrium cavitation and further stretching, and similarity with the spall fracture of solids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 127, Part C. – P. 643–657. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.053>.
- [5] Mayer A.E., Mayer P.N. Detection of void nucleation, coalescence and collapse in atomistic simulations // *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*. – 2023. – V. 8(4). – P. 594–604. <https://doi.org/10.47475/2500-0101-2023-8-4-594-604>.
- [6] Mayer P.N., Mayer A.E. Effect of hydrogen- and oxygen-containing heterogeneities on the tensile strength of solid and molten aluminum // *Computational Materials Science*. – 2021. – V. 196. – P. 110563. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110563>.
- [7] Mayer A.E., Mayer P.N. Weak increase of the dynamic tensile strength of aluminum melt at the insertion of refractory inclusions // *Computational Materials Science*. – 2016. – V. 114 – P. 178–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.12.040>.
- [8] Mayer A.E., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Mayer P.N. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 113 (19) – P. 193508. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4805713>.
- [9] Mayer A.E., Mayer P.N. Evolution of pore ensemble in solid and molten aluminum under dynamic tensile fracture: Molecular dynamics simulations and mechanical models // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2019. – V. 157–158. – P. 816–832. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.023>.
- [10] Mayer A.E., Mayer P.N. Strain rate dependence of spall strength for solid and molten lead and tin // *International Journal of Fracture*. – 2020. – V. 222. – P. 171–195. <https://doi.org/10.1007/s10704-020-00440-8>.
- [11] Mayer P.N., Pogorelko V.V., Voronin D.S., Mayer A.E. Spall fracture of solid and molten copper: molecular dynamics, mechanical model and strain rate dependence // *Metals*. – 2022. – V. 12(11). – P. 1878. <https://doi.org/10.3390/met12111878>.
- [12] Rodionov E.S., Pogorelko V.V., Lupanov V.G., Fazlitdinova A.G., Mayer P.N., Mayer A.E. Dynamic deformation and fracture of brass: Experiments and dislocation-based model // *International Journal of Plasticity*. – 2024. – V. 183. – P. 104165. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104165>.