

**РОЛЬ РОТАЦИОННЫХ МОД ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЗАРОЖДЕНИЯ
ТРЕЩИНЫ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕТОДОМ ВОЗБУДИМЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ**

Д.Д. МОИСЕЕНКО¹, П.В. МАКСИМОВ¹, А.С. БЕСПАЛОВ², С.В. ПАНИН^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

²Томский политехнический университет

E-mail: 16aleks16@gmail.com

**ROLE OF ROTATIONAL DEFORMATION MODES IN CRACK
GENERATION UNDER SHOCK LOADING. SIMULATION BY
EXCITABLE CELLULAR AUTOMATA**

D.D. MOISEENKO¹, P.V. MAKSIMOV¹, A.S. BESPALOV², S.V. PANIN^{1,2}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

²Tomsk Polytechnic University

E-mail: 16aleks16@gmail.com

Annotation. Numerical experiments of uniaxial shock loading of specimens with three typical notch shapes are performed to investigate rotational deformation modes. It is shown that stress relaxation occurs most effectively when the modulation of various components of the force moment takes place at various scales. This offers the possibility to reduce the stress concentration substantially by tailoring the materials microstructure.

Введение. В настоящее время широко известно, насколько важен учет ротационных мод деформации в процессе разрушения материала [1-5]. В работе [2] хорошо описан эксперимент по формированию цепочек ротаций за фронтом ударной волны, вскрыта роль ротационных мод деформации в процессе откола. Возможности компьютерного моделирования с учетом поворотных мод дискретными методами представлены в работах [4-5]. Работа [3] посвящена возможностям построения аналитической теории самосогласованных поворотных мод в виде «турбулентных течений» в твердом теле со структурой. В работе [7] продемонстрирована главенствующая роль поворотных мод деформации в процессах растворения алюминиевой фольги в условиях знакопеременного нагружения, а также проникания твердых частиц вглубь материала [7]. Предложенная в [1] теория ротационно-волновых потоков в планарных подсистемах, хорошо объясняющая упомянутые экспериментальные исследования, так и не нашла своего прямого экспериментального подтверждения. В работе [8] подробно рассмотрены проблемы идентификации ротационных мод деформации при анализе векторов смещений оптико-телевизионным методом.

Таким образом, экспериментальное наблюдение столь маломасштабных и быстротекущих процессов весьма трудоемко и не всегда оправдано в силу неоднозначности интерпретации результатов. В связи с этим, данный раздел работы посвящен компьютерному моделированию процессов переноса энергии и массы на мезомасштабном уровне в непосредственной близости от вершины надреза.

Метод моделирования. В настоящее время коллективом авторов разработан и хорошо аттестован метод возбудимых клеточных автоматов. В рамках данного метода исходя из соотношения Торнбулла рассчитывается скорость потока вещества через рассматриваемую границу \vec{v}_{ik}^{n-1} под действием напряжения $\vec{\sigma}_{ik}^{n-1}$:

$$\vec{v}_{ik}^{n-1} = m_{ik} \cdot \vec{\sigma}_{ik}^{n-1}. \quad (1)$$

Здесь m_{ik} – подвижность границы между i -м элементом и его k -м соседом.

Исходя из полученных линейных скоростей переноса вычисляются угловые скорости поворотной моды потока переноса (рисунок 1):

$$\vec{\omega}_i^n = \sum_k \sum_l \frac{\vec{r}_{ikl} \times \vec{v}_{kl}^{n-1}}{|\vec{r}_{ikl}|^2}. \quad (2)$$

Далее вычисляются вектор потока вещества в i -й элемент из его k -го соседнего элемента ($\Delta \vec{v}_{ik}^n$) и соответствующий вектор потока механической энергии в i -й элемент через рассматриваемую границу ($\Delta \vec{A}_{ik}^n$):

$$\Delta \vec{v}_{ik}^n = S_c \vec{v}_{ik}^{n-1} \Delta t, \quad (3)$$

$$\Delta \vec{A}_{ik}^n = -|\Delta \vec{v}_{ik}^n| \vec{\sigma}_{ik}^{n-1}. \quad (4)$$

Здесь Δt – величина временного шага, S_c – площадь границы элементов. В данном случае величина вектора потока вещества $\Delta \vec{v}_{ik}^n$ определяет объём материала, переместившегося через границу в заданном направлении.

В модели явно учитывается диссипационный член энергии микровращений элементов среды, определяемый согласно следующей формуле:

$$[\Delta \vec{A}_d]_i^n = \frac{k_{diss} G_i |\Delta \vec{\gamma}_i^n| \pi r_c^3}{2} \Delta \vec{\gamma}_i^n. \quad (5)$$

Здесь $\Delta \vec{\gamma}_i^n$ – приращение векторного угла разворота элемента среды, $\Delta \vec{\gamma}_i^n = \tau \vec{\omega}_i^n$; G_i – модуль сдвига, k_{diss} – коэффициент диссипации (может быть измерен экспериментально), r_c – радиус активного элемента.

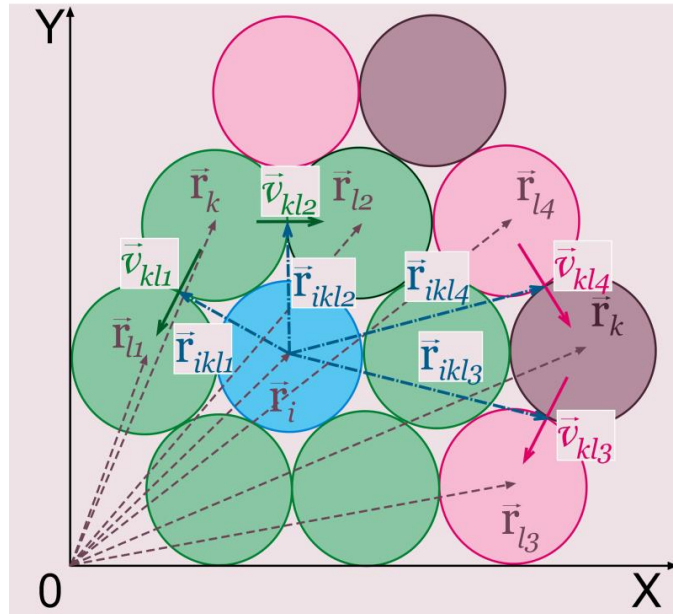


Рисунок 1 - Схема расчета угловой скорости вихря в активном элементе клеточно-го автомата (двумерный случай)

Численный эксперимент. SECA методом проведены численные эксперименты (ЧЭ) по одноосному быстрому циклическому сжатию стальных образцов с 3-мя видами надрезов: U-, V- и I-образным. Была явным образом учтена диссипация энергии при локальных разворотах материала (формула 5). Каждый образец моделировался посредством клеточного автомата с ГЦК упаковкой элементов размером 1 мкм. Размеры образцов: 60 мкм X 40 мкм X 10 мкм. Начальная температура каждого элемента задавалась равной 300 К, начальные значения деформации и напряжения были нулевыми. Величина временного шага – 1 нс. Верхняя торцевая грань, противоположная грани с надрезом, подвергалась деформации сжатия со скоростью 400 с^{-1} вдоль вертикальной оси.

Предварительный анализ диаграмм нагружения всех трех образцов показал наименьшее значение величины всесторонних напряжений для образца с I-образным надрезом, в то время как график зависимости энергии кручения от времени показал наибольшие значения для этого же образца. В целях исследования поведения материала вблизи вершины надреза были построены пространственные распределения компонент Z и Y момента силы (рисунок 2). Картины распределения компоненты Y момента силы позволяют сделать вывод о зарождении областей локализации пластической деформации на мезомасштабном уровне в виде полос сдвига противоположного знака, ориентированных под углом 45 градусов относительно оси нагрузки. Такое же поведение материала наблюдается и в образце с V-образным надрезом. Однако, уровень моментных напряжений в лицевой плоскости образца (компонента Y) в два раза ниже в образце с V-образным надрезом. Отметим, что ротационные компоненты деформации в данном случае несут в себе релаксационную функцию по отношению к упругой энергии на микромасштабном уровне. То есть, чем выше уровень моментов сил, тем ближе материал к пластичности и тем ниже становится его сопротивление сдвигу, что сказывается на релаксации напряжений вблизи концентратора.

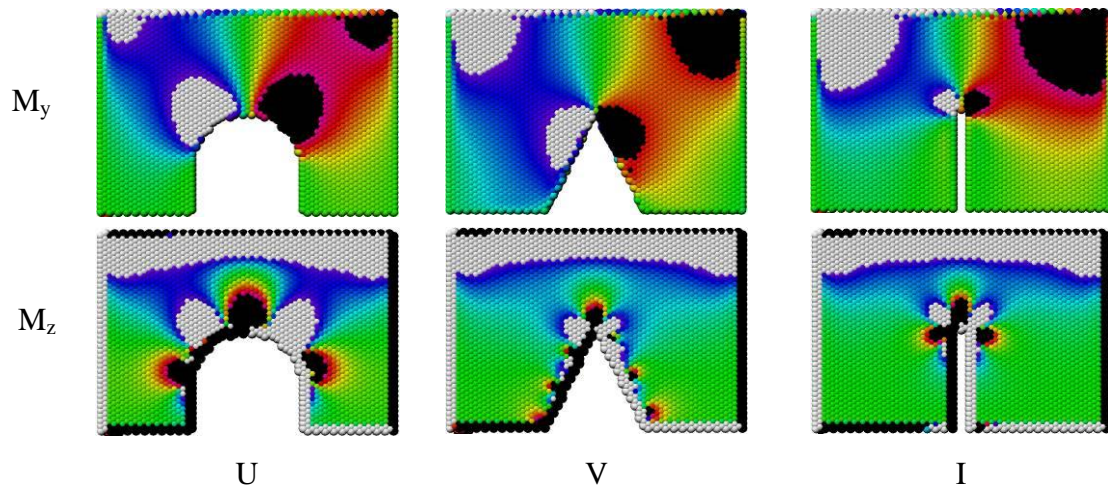


Рисунок 2 – Распределение компонент момента силы в различных образцах в конце численного эксперимента

На картинах распределения компоненты Z момента силы можно видеть формирование периодического распределения этой величины в виде полуэллиптических зон с чередованием знака. Для образца с V-образным надрезом видно, что че-

редующиеся по знаку моментные напряжения захватывают всю поверхность надреза в виде низкоразмерных модуляций, обеспечивая тем самым релаксацию напряжений на более низком масштабном уровне.

Отдельного внимания заслуживает анализ распределения моментов сил в образце с I-образным надрезом. Видно, что качественно картина распределения компоненты Y сильно разнится с аналогичными картинками для других образцов. В области вершины надреза мы видим формирование двух сильно локализованных зон различного знака, стремящихся к образованию полос, перпендикулярных оси нагрузки. Картина пространственного распределения компоненты Z момента силы вблизи концентратора напряжений (острия надреза) показывает строго периодическое концентрическое распределение в виде полуэллиптических зон, чередующихся по знаку. Такое сочетание компонент момента силы в образце с I-образным надрезом дало большую релаксационную способность, что привело к формированию более низкого уровня напряжений в области концентратора.

Выводы. Анализ результатов численных экспериментов позволил вскрыть взаимосвязь величины концентрации напряжений и локальных моментов сил. Показано, что локальные моменты сил, являющиеся стоками энергии, способны снижать уровень напряжений вблизи концентратора в виде надреза. Детальный анализ распределения моментов сил вблизи концентратора напряжений позволил вскрыть взаимосвязь ротационных мод деформации на различных масштабных уровнях. Релаксация напряжений при этом происходит посредством модуляций величины и знака момента силы.

Список литературы

1. Panin V. E., Egorushkin V. E.. Curvature Solitons as Generalized Structural Wave Carriers of Plastic Deformation and Fracture, *Phys. Mesomech.*, 16(4) (2013) 267.
2. Meshcheryakov Yu. I., Khantuleva T. A.. Nonequilibrium Processes in Condensed Media: Part 1. Experimental Studies in Light of Nonlocal Transport Theory, *Phys. Mesomech.*, 18(3) (2015) 228.
3. Mukhamedov A.M.. Deindividuation Phenomenon: Links between Mesodynamics and Macroscopic Phenomenology of Turbulence, *Phys. Mesomech.*, 18(1) (2015) 24.
4. Psakhie, S.G. Zolnikov K.P., Dmitriev A.I., Smolin A.Yu., Shilko E.V. Dynamic vortex defects in deformed material, *Phys. Mesomech.*, 17(1) (2014) 17.
5. Psakhie S.G., Shilko, E.V. Popov M.V., Popov V.L.. The key role of elastic vortices in the initiation of intersonic shear cracks, *Phys. Rev. E.*, 91 (2015) 063302.
6. Panin V.E., Surikova N.S., Elsukova T.F., Egorushkin V.E., Pochivalov Yu.I.. Nanostructured phase boundaries in aluminum under severe cyclic plastic deformation, *Phys. Mesomech.*, 13(3-4) (2010) 103.
7. Panin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D., Shlyapin, A.D. Avraamov Yu.S., Koshkin V.I.. Physical mesomechanics of a deformed solid as a multilevel system. IV. Effect of particle interpenetration without continuity violation under the action of concentrated energy fluxes. *Phys. Mesomech.*, 10(1-2) (2007) 25.
8. Kibitkin V. V., Solodushkin A. I., Pleshanov V. S., Chertova N. V.. Identification Criteria for Vortex Structures in a Deformed Solid. *Phys. Mesomech.*, 17(2) (2014) 141.