

УДК 534.1

Моделирование процесса разрыва стального бруска методом частиц в среде MSC.Adams*

С.В. Аринчев, Yuri Sillano

Рассмотрены эффекты «усадки» и «взрыва» стального бруска, а также необходимость введения вязкого трения для демпфирования интенсивных колебаний молекул в окрестности положения статического равновесия. Брусок представляется дискретной совокупностью сравнительно небольшого количества «молекул». Силовая характеристика молекулы выбирается из условия максимума соответствия экспериментальной кривой разрыва опытного образца, полученной на разрывной машине Zwick/Roell.

Ключевые слова: стальной брусок, метод частиц, силовая характеристика молекулы, экспериментальная кривая разрыва, интерфейс MSC.Adams.

Modeling of steel bar fracture process by method of particles in MSC.Adams

S.V. Arinchev, Yuri Sillano

The steel bar «shrinkage» and «explosion» effects are discussed, as well as the necessity to use artificial viscous friction to provide damping of molecules intense oscillations in the vicinity of their static-equilibrium state. The bar is considered as a discrete set of a relatively small quantity of «molecules». The force characteristic of each molecule is chosen in order to provide a maximum compliance with the experimental tension-fracture curve, obtained using a Zwick/Roell pull-test machine.

Keywords: steel bar, method of particles, molecule power characteristic, tension-fracture curve, MSC.Adams interface.

Брусок из Стали 3 имеет форму параллелепипеда $0,03 \times 0,01 \times 0,01$ м с поперечным сечением 1 см^2 . Данные размеры соответствуют средним размерам опытных образцов, используемых в промышленности для исследования характеристик сталей [1, 2]. Масса бруска $0,0234$ кг. На рисунке 1 представлен опытный образец. Рассматриваемый брусок представляет собой его среднюю часть.

Опытный образец дополнительно имеет «уши», которые крепятся в захватах разрывной машины. Посередине образца нанесена риска, которая (в большинстве случаев) локализует место разрыва.

Эксперимент проводился в лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана на разрывной машине Zwick/Roell

* Авторы статьи выражают глубокую благодарность доценту кафедры «Прикладная механика» Б.В. Букеткину за помощь в проведении разрывных испытаний и учебному мастеру кафедры «Аэрокосмические системы» А.Ю. Гусенко за помощь в изготовлении опытных образцов.



АРИНЧЕВ

Сергей Васильевич
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Аэрокосмические
системы»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана;
e-mail: arinchev@inbox.ru)



Yuri Sillano

студент
(Politecnico di Milano;
e-mail:
yuri.sillano@gmail.com)



Рис. 1. Опытный образец с риской

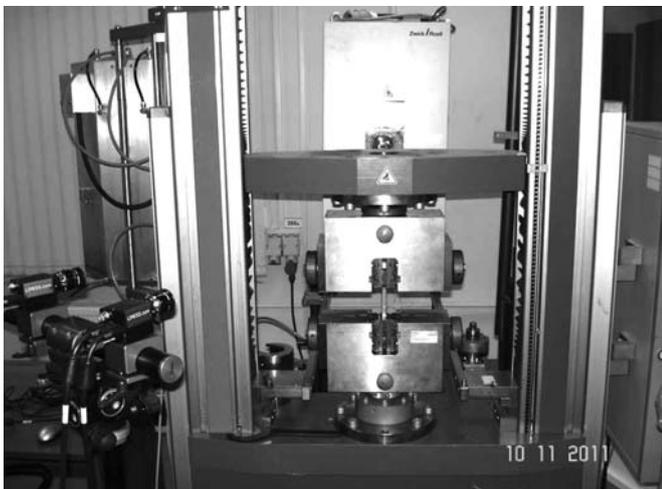


Рис. 2. Разрывная машина Zwick/Roell в сборе с опытными образцом

(рис. 2). Нижний захват машины неподвижен. В эксперименте моделируется статическое нагружение: верхний захват машины движется достаточно медленно со скоростью 5 мм/мин, однако, заключительный этап разрыва бруска протекает очень динамично и сопровождается оглушительным хлопком. Моделирование именно этого, заключительного этапа разрыва представляет особый интерес.

В эксперименте получено пять реализаций кривой разрыва образца. Характерная реализация показана в интерфейсе Zwick/Roell на рис. 3. По оси ординат отложено продольное суммарное усилие в бруске (Н), по оси абсцисс — смещение (мм) подвижного захвата разрывной машины.

Для всей серии измерений максимальное усилие разрыва не превышало 5 т. Смещение подвижного захвата в момент разрыва принято равным 13,4 мм. В данной работе предполагается, что смещение подвижного захвата равно суммарному удлинению бруска. На рисунке видно, что участок текучести не является горизонтальной кривой, это — ломаная. Можно предположить, что процесс разрыва является ступенчатым: обрыв отдельных связей — поиск нового положения статического равновесия, обрыв отдельных связей — поиск нового положения статического равновесия, обрыв отдельных связей — поиск нового положения статического равновесия и т. п. Данная гипотеза

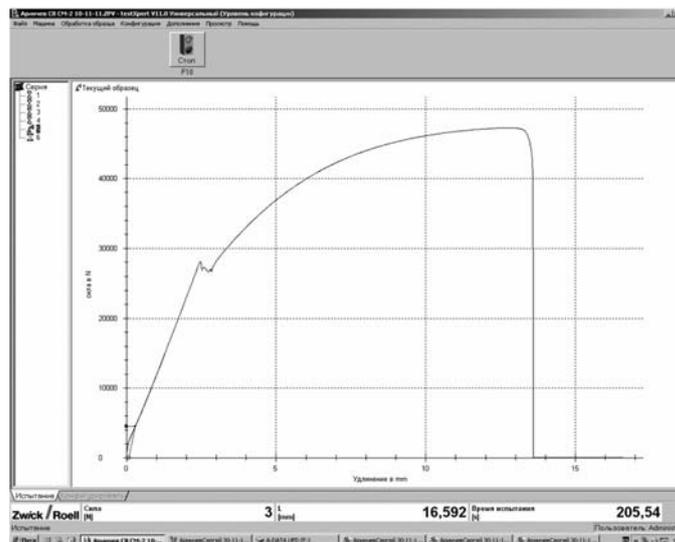


Рис. 3. Характерная реализация кривой разрыва опытного образца в интерфейсе Zwick/Roell

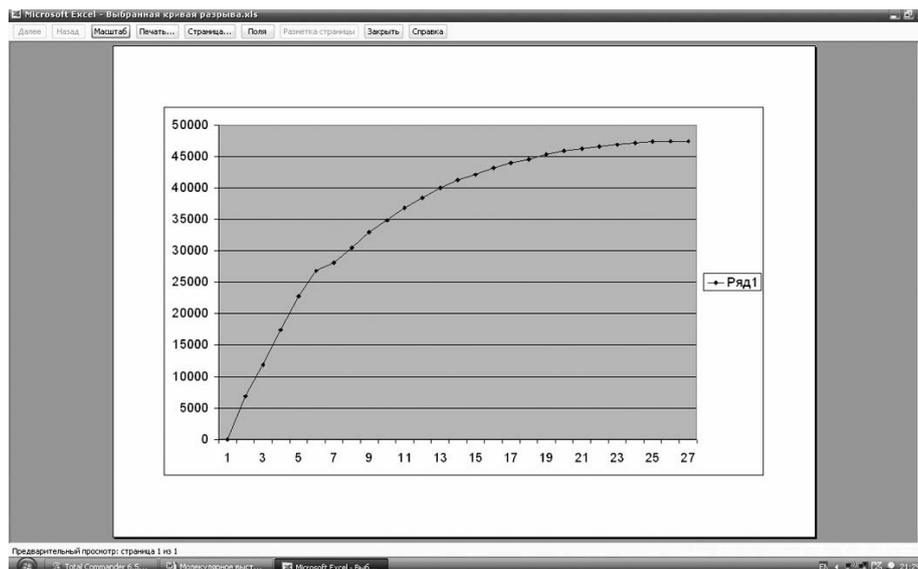


Рис. 4. Экспериментальная кривая разрыва бруска в интерфейсе Microsoft Excel

полностью подтверждается при компьютерном моделировании.

На рисунке 4 в интерфейсе Microsoft Excel представлена усредненная кривая разрыва, которая является основным результатом эксперимента.

Цель компьютерного моделирования — подобрать силовую характеристику молекулы из условия минимума невязки расчетной кривой разрыва и данной экспериментальной кривой разрыва.

Для компьютерного моделирования процесса разрыва бруска авторы отказались от гипотезы сплошности среды и представили брусок набором сравнительно небольшого числа мак-

ромолекул. На рисунке 5 показана аппроксимация бруска $13 \times 5 \times 5 = 325$ молекулами в интерфейсе MSC.Adams. Это максимальная размерность задачи, рассматриваемая в данной статье. Заднее сечение бруска во всех расчетных случаях фиксируется в неподвижном захвате разрывной машины, переднее сечение — в подвижном захвате. Скорость движения подвижного сечения модели бруска 5 мм/мин. Рассматриваемое количество связей между молекулами модели весьма велико. Для их формирования необходимо написание специальной программы на языке View Command Language.

Рассматриваемый метод расчета называется методом частиц. Основные положения этого

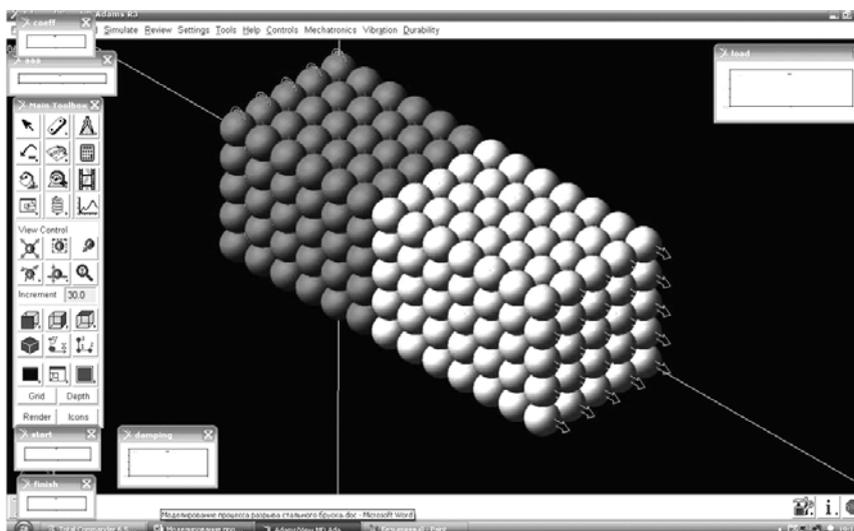


Рис. 5. Аппроксимация бруска $13 \times 5 \times 5 = 325$ молекулами в среде MSC.Adams

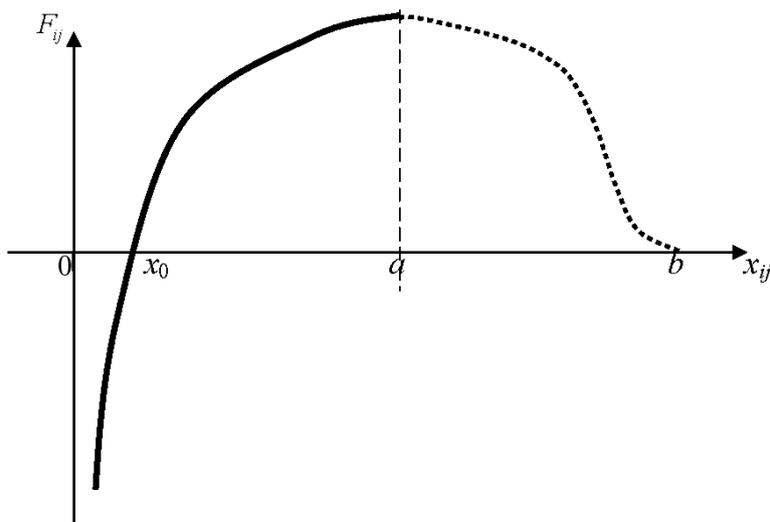


Рис. 6. Общий вид силовой характеристики молекулы

метода сформулированы в работах [3–5]. Родственная задача механики сыпучих сред рассмотрена в работе [6]. На современном этапе основное применение имеет в задачах материаловедения и кристаллографии. Инженерные приложения метода изучены недостаточно.

Основным понятием метода частиц является понятие потенциала взаимодействия молекул (силовой характеристики молекулы). Силовая характеристика молекулы — зависимость силы взаимодействия молекул от расстояния между ними (рис. 6).

В точке с координатой x_0 сила взаимодействия равна нулю (см. рис. 6). Левее этой точки имеет место отталкивание, правее — притяжение. Чем правее находится молекула — тем скорее она оторвется. Известные потенциалы Леннарда – Джонса, Ми, Морзе и другие [3, 4, 7] недостаточны для аппроксимации кривой разрыва при сравнительно небольшом числе n молекул. Поэтому в данной статье сплошной участок кривой (см. рис. 6) аппроксимируется логарифмом, а пунктирный участок кривой — распределенной функцией Хависайда (стандартной step-функцией), представленной кубической параболой в интервале $[a, b]$:

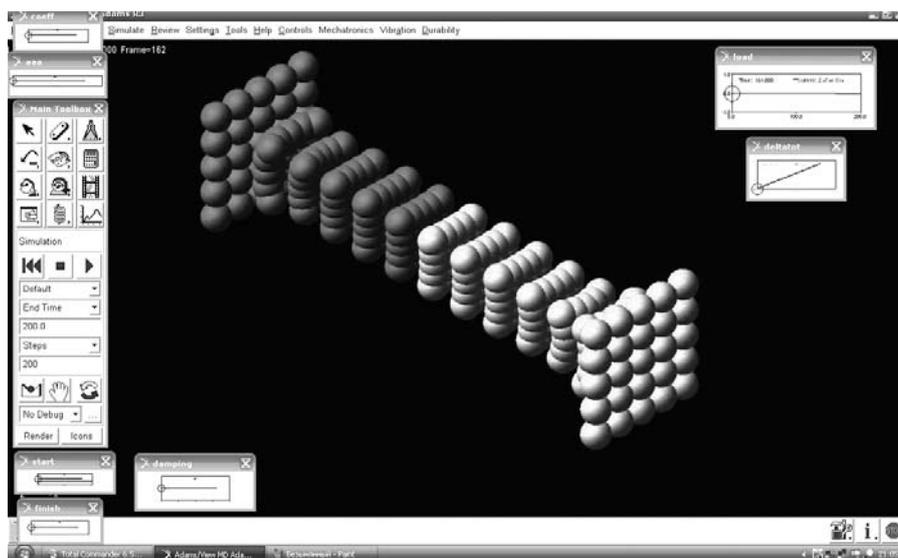


Рис. 7. Усадка бруска 13×5×5 (325 молекул) с момента начала интегрирования уравнений динамики

Расчетные параметры модели бруска, рекомендуемые для проведения численного эксперимента в среде MSC.Adams

№ п/п	Размерность модели	T	N	A	B	a	b	d	Solver*
1	2×1×1 (2 молекулы)	15*	500	10000	260	13,4	13,5	0	Gstiff
2	4×1×1 (4 молекулы)	200	200	10000	260	4,4	4,6667	0	Gstiff
3	4×2×1 (8 молекул)	500	500	2500	260	4,3	4,6667	10,0	HHT
4	4×2×2 (16 молекул)	200	200	2500	260	3,5	4,6667	5,0	Gstiff
5	7×3×3 (63 молекулы)	200	200	1400	260	0,4	2,2333	9000	HHT
6 (риска)	10×4×4 (160 молекул) (риска)	200 (400)	200 (400)	700 (100)	260	0,4	1,4888	9000 (1500)	HHT
7 (усадка)	13×5×5 (325 молекул)	200	200	10	260	0,4	1,4888	800	Gstiff

*Solver — рекомендуемый метод интегрирования уравнений динамики:

$T(c)$ — рекомендуемое время интегрирования до момента разрыва; N — начальное рекомендуемое число шагов интегрирования (в процессе интегрирования шаг активно изменяется).

Примечание. Для модели 2×1×1 (обе молекулы зажаты захватами разрывной машины) рекомендуемое время интегрирования составляет 15 с, так как скорость движения подвижного захвата здесь незначительна и принималась равной 1 мм/с.

$$F_{ij} = -A \lg \left(B \frac{x_{ij} - x_0}{x_0} + 1,0 \right) \text{step}(x_{ij}, a, 1, b, 0) - d \dot{x}_{ij} \quad (1)$$

$i, j = 1, \dots, n,$

где A — коэффициент пропорциональности; B — коэффициент формы логарифмической

функции; a — коэффициент «включения» step-функции (см. рис. 6); d — коэффициент искусственно вводимого вязкого трения.

Последнее слагаемое — искусственно вводимая сила вязкого трения, необходимая для демпфирования интенсивных колебаний молекул.

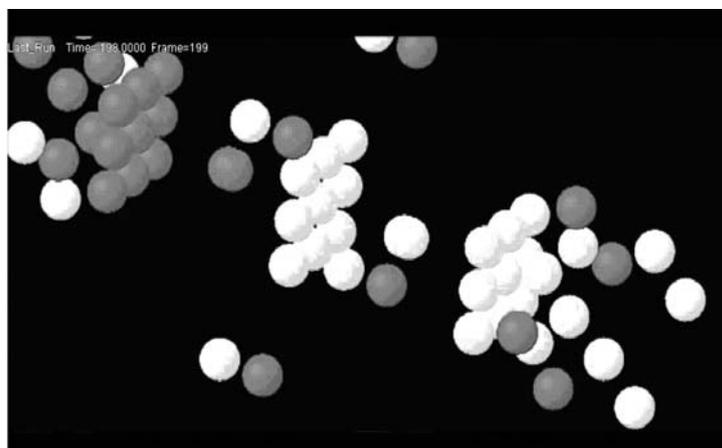


Рис. 8. Взрыв бруска 7×3×3, вызванный разрывом подструктуры

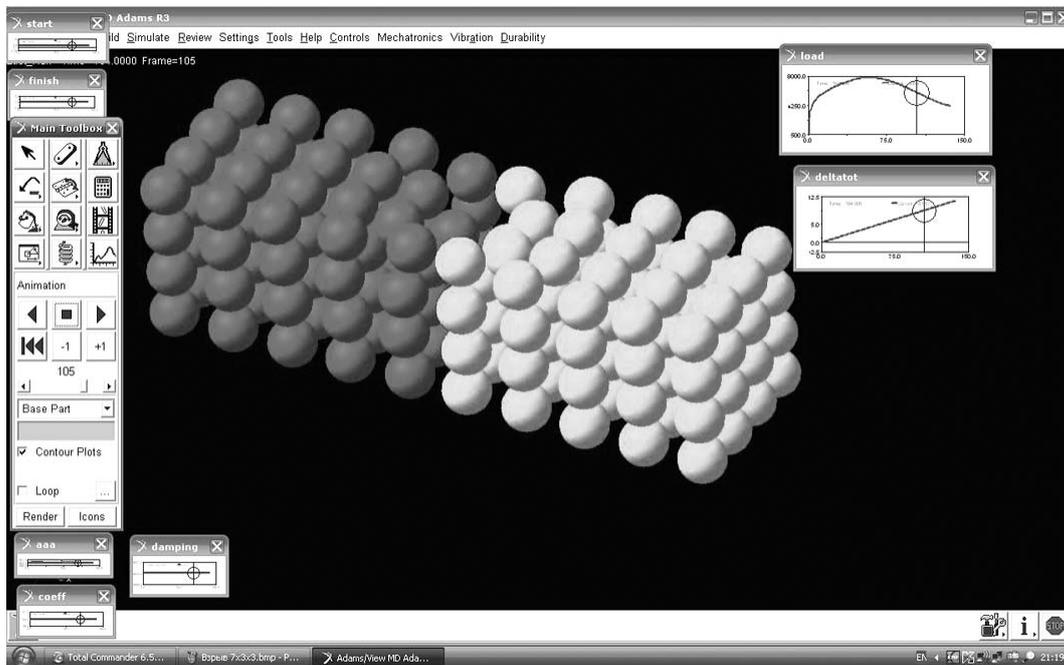


Рис. 9. Образование дефекта на верхней поверхности бруска в окрестности риски

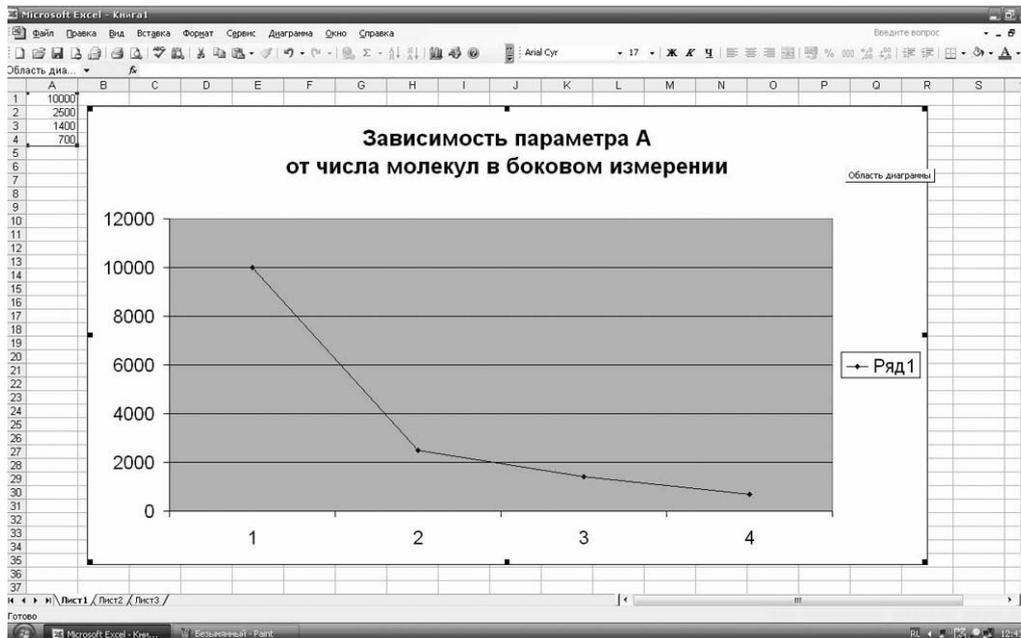


Рис. 10. Зависимость параметра A от числа молекул в боковом измерении

кул в окрестности положения статического равновесия, возникающих при начальной усадке и в моменты разрыва подструктур бруска. Силовая характеристика имеет пять варьируемых параметров A , B , a , b , d (см. рис. 6 и таблицу). Их значения выбирают из условия минимума невязки расчетной и экспериментальной (см. рис. 4) кривых разрыва.

Уравнения динамики молекул модели имеют вид

$$-m\ddot{\vec{r}}_j + \sum_{i=1}^n \vec{F}_{ij} = 0, \quad j = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где m — масса молекулы; \vec{r}_j — радиус-вектор молекул; F_{ij} — сила взаимодействия i -й и j -й молекул.

Уравнения интегрируются в среде MSC.Adams методом Гира (Gstiff) или методом Адамса (ННТ). Традиционно задачи метода частиц решаются на суперкомпьютерах с распараллеливанием вычислений [8]. В данном случае оказалось достаточно типового ноутбука ACER Extensa 5630G (оперативная память 3 Гбайт, 2 процессора Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU T5800 с быстродействием 2,00 ГГц каждый). Время «развертывания» модели $13 \times 5 \times 5$ (325 молекул) в среде MSC.Adams составляет около 30 мин, время загрузки развернутой базы данных и расчета рассматриваемой модели на данном компьютере — 5...10 мин.

Кривая, изображенная на рис. 6, отражает тот факт, что в начальный момент времени модель уже имеет внутренние напряжения. Молекулы интенсивно «ищут» положение статического равновесия. Моделирование процесса разрыва бруска выявило эффект усадки (рис. 7). Переднее и заднее сечения остаются неизменными — зажаты в захватах разрывной машины. Эффект усадки связан с интенсивными колебаниями молекул в окрестности положения их статического равновесия.

Интенсивные колебания молекул могут возникнуть и при разрывах подструктур. На рисунке 8 изображен взрыв (разлет молекул) бруска, вызванный разрывом подструктуры.

Возникновение усадок и взрывов препятствует эффективному интегрированию уравнений динамики. Для возможности решения в уравнения динамики введено искусственное

демпфирование. Это позволило рассмотреть влияние дефекта (риски) верхней поверхности бруска на процесс его разрушения (рис. 9). Дефект организован искусственно: обнулены связи между двумя парами темных и светлых молекул на верхней грани бруска. Сначала брусок разрывается в окрестности дефекта, затем разрушение распространяется по всему объему.

По рисунку 10 можно судить о скорости сходимости результатов решения задачи по числу молекул модели в поперечном направлении.

Литература

1. ГОСТ 28870—90. Методы испытаний на растяжение толстолистового проката в направлении толщины. Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. М.: Издательство стандартов, 1992. 6 с.
2. ГОСТ 25503—97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний на сжатие. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск: Издательство стандартов, 1997. 26 с.
3. *Кривцов А.М., Кривцова Н.В.* Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. 2002. Т. 3. № 2. С. 254—276.
4. *Индейцев Д.А., Кривцов А.М., Ткачев П.В.* Исследование методом динамики частиц взаимосвязи между откольной прочностью и скоростью деформирования твердых тел // Доклады Академии Наук РФ. 2006. Т. 407. № 3. С. 1-3.
5. http://www.ipme.ru/ipme/labs/msm/MD_2D/index.html
6. https://yade-dem.org/wiki/Screenshots_and_videos#Cylinder_outflow
7. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т. 1. М.: Наука. 1970. 512 с.
8. <http://www.ihed.ras.ru/norman/student/1-grid2.php>

Статья поступила в редакцию 11.04.2012