

Расчет и конструирование машин

УДК 534.1

Моделирование процесса сильного сжатия фторопласта Ф-4 методом частиц в среде MSC.Adams

С.В. Аринчев

В задачах разрушения деформируемого твердого тела использование классической гипотезы непрерывности среды недостаточно. В предлагаемой статье тело моделируется набором частиц (макромолекул). Макромолекула описывается силовой характеристикой.

Работа состоит из двух частей: экспериментальной и расчетной. В экспериментальной части брусок из фторопласта Ф-4 размерами 30×10×10 мм сжимается в лабораторной машине и по полученным результатам построена экспериментальная кривая сильного сжатия бруска. В расчетной части показано, что теоретическую силовую характеристику макромолекулы можно выбрать так, что расчетная кривая сильного сжатия бруска будет близка к экспериментальной.

Ключевые слова: фторопласт, лабораторная машина, опытный образец, экспериментальная кривая сжатия, расчетная модель, силовая характеристика макромолекулы, уравнения динамики сжатия бруска, точность интегрирования.

Simulation of Fluoroplastic F-4 Strong Compression Process by Method of Particles with MSC.Adams

S.V. Arinchev

For destruction problems of deformable solids, the classic continuity hypothesis may happen to be insufficient. In this issue the solid is modeled by a set of particles (macromolecules).

The macromolecule is specified by its force characteristic. The study consists of two parts: an experimental part and a computational part. In the experimental part the fluoroplastic bar (30×10×10 mm) is subjected to high-ratio compression



АРИНЧЕВ
Сергей Васильевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ARINCHEV
Sergey Vasilievich
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N.E. Bauman)

using a laboratory machine and according to the results the experimental bar-compression curve is obtained.

In the computational part it is shown that the theoretical macromolecule force characteristic may be selected so, that the calculated bar-compression curve approximates the experimental one.

Keywords: fluoroplastic, laboratory machine, experimental model, experimental bar-compression curve, computational model, macromolecule force characteristic, dynamic equations for bar-compression, integration accuracy.

Метод частиц имеет большие перспективы. Представление о современном состоянии данного метода дано в работе [1]. Отметим, что основные результаты в [1] получены в области динамики жидкостей и сыпучих сред. Проблемы деформирования твердых тел из современных конструкционных материалов изучены недостаточно. В предлагаемой статье частица рассматривается как макромолекула, что позволяет использовать традиционные понятия молекулярной физики. Решение указанных задач связано с интегрированием уравнений динамики макромолекул твердого тела. В работе [2] показано, что чем прочнее материал, тем труднее интегрируется задача Коши. В настоящей статье рассмотрен фторопласт марки Ф-4 — широко распространенный конструкционный материал невысокой прочности [3]. В статье все линейные размеры выражены в миллиметрах, что обусловлено особенностями работы лабораторного силового оборудования и электронного микроскопа, использованного для изучения характера разрушения опытных образцов.

Предлагаемая работа состоит из двух частей: экспериментальной и теоретической. Эксперимент выполнялся в лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. На рисунке 1 показана установка опытного образца фторопласта Ф-4 [3] между рабочими пластинами лабораторной машины сжатия. Верхняя пластина движется вниз. Нижняя пластина — неподвижна. Нагружение производится достаточно медленно, т. е. статически.

Перед началом сжатия всегда выбираются зазоры между деталями лабораторной сборки.

Испытано семь образцов. Все образцы отрезаны от одного куска. Однако характер их разрушения оказался различным. Характер разрушения образцов изучался на электронном микроскопе кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Оказалось, что в эксперименте реализуются два варианта разрушения: объемное разрушение с трещиной по диагонали (рис. 2) и локальное разрушение с боковым дефектом (рис. 3).

На рисунке 4 представлено семейство семи кривых сильного статического сжатия бруска. Видно, что кривые имеют существенный случайный разброс. Из данного семейства выбрана характерная кривая (рис. 5) для сравнения с результатами численного моделирования.



Рис. 1. Установка бруска из фторопласта Ф-4 между рабочими пластинами лабораторной машины сжатия

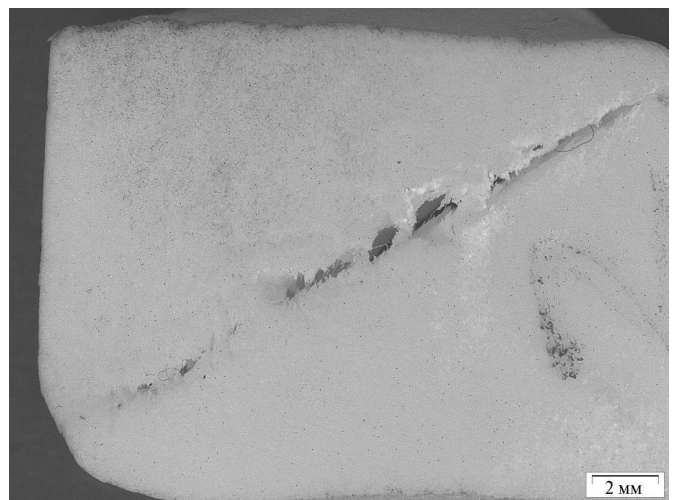


Рис. 2. Объемное разрушение бруска по диагонали

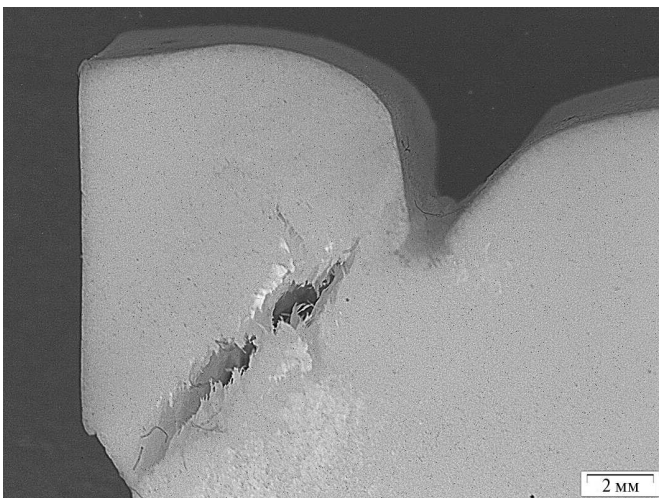


Рис. 3. Разрушение бруска с локальным боковым дефектом

В расчетной части настоящей статьи проведено моделирование процесса сжатия бруска в пакете MSC.Adams. Недеформированная расчетная модель представлена на рис. 6. Макромолекулы фторопласта расставлены в узлах расчетной кубической решетки с шагом l . Слева и справа показаны рабочие пластины лабораторной машины сжатия. Левая пластина неподвижна. Правая пластина движется с заданной постоянной скоростью. Между бруском и рабочими пластинами предусмотрен начальный зазор 0,1 мм.

Расчеты показывают, что сжатие (вопреки традиционным представлениям) представляет

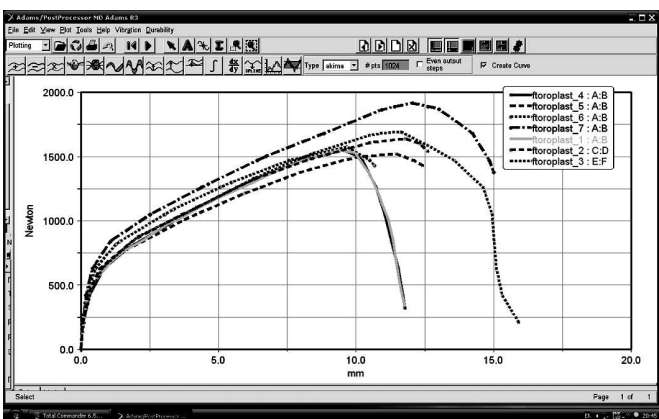


Рис. 4. Экспериментальные кривые сжатия фторопласта Φ-4. По вертикальной оси отложено суммарное усилие сжатия, H , приложенное к рабочей пластине лабораторной машины, по горизонтальной оси — смещение верхней рабочей пластины лабораторной машины, мм

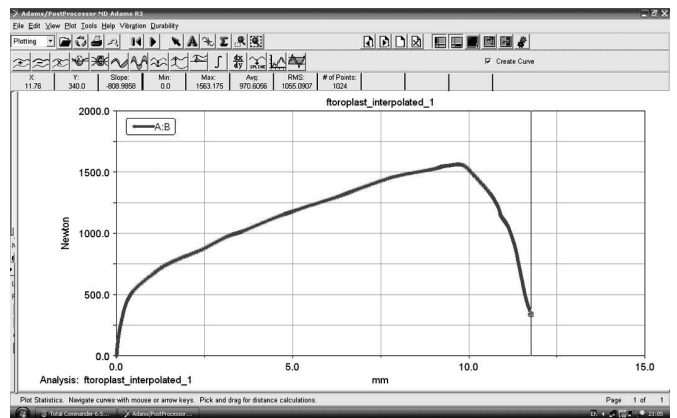


Рис. 5. Экспериментальная кривая сжатия бруска из фторопласта Φ-4

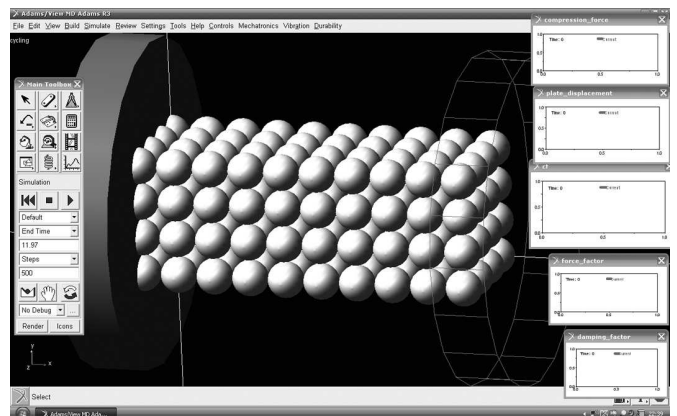


Рис. 6. Модель бруска из 160 молекул (10×4×4), представленная в интерфейсе пакета MSC.Adams

собой не непрерывный монотонный статический процесс, а последовательность скачкообразных переходов рассматриваемой системы макромолекул из одного состояния статического равновесия в другое. При сжатии одни подсистемы макромолекул разрушаются (лопаются) и образуют другие подструктуры. Процесс перехода из одного состояния статического равновесия в другое является крайне динамичным. Его изучение требует составления уравнений динамики сжатия, формирования задачи Коши с начальными условиями и ее интегрирования.

Уравнения динамики сжатия рассматриваемой системы макромолекул фторопласта имеют вид

$$-m_j \ddot{\mathbf{r}}_j - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \mathbf{F}_{jk} + \mathbf{F}_{j\text{left}} + \mathbf{F}_{j\text{right}} = 0, \quad (1)$$

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

где n — число макромолекул модели; m_j — масса макромолекулы; \mathbf{r}_j — радиус-вектор макромолекулы;

$$F_{j\text{left}} = B \dot{x}_j \text{step}(x_j - x_{\text{left}} - 1, 1, 0, 0) \quad (2)$$

— сила взаимодействия макромолекулы с левой рабочей пластиной лабораторной машины; B — гидравлический коэффициент; $\text{step}(\cdot)$ — стандартная функция языка внутреннего программирования пакета MSC.Adams.

Интегрирование уравнений динамики сжатия представляет значительные сложности. Поэтому считается, что эти силы взаимодействия имеют «гидравлический» характер, они пропорциональны скорости движения макромолекулы относительно пластины в проекции на продольную ось бруска (ось x).

Функция (2) — «ступенька», но не резкая, а растянутая в интервале 1 мм. Это означает, что как только макромолекула попадает в плоскость неподвижной рабочей пластины лабораторной машины усилие контакта постепенно (на интервале 1 мм) возрастает от нуля до максимального значения. Изначально между неподвижной пластиной и бруском имеется зазор 0,1 мм, т. е. $x_{\text{left}} = -0,1$ мм.

$$F_{j\text{right}} = -B(\dot{x}_j - v_0) \text{step}(x_j - x_{\text{right}}, 0, 0, 1, 1) \quad (3)$$

— соответственно сила взаимодействия макромолекулы с подвижной пластиной лабораторной машины. Пластина движется по закону $x_{\text{right}} = -v_0 t + 30,1$ мм с начальным зазором 0,1 мм; v_0 — скорость движения подвижной рабочей пластины лабораторной машины.

$$F_{jk}(x_{jk}) = A(x_{jk} - a_1)^p \left[\prod_{i=1}^7 (x_{jk} - a_i) \right] \times \text{step}(x_{jk}, 2sl, 1, 2l, 0) + f \dot{x}_{jk} \quad (4)$$

— сила взаимодействия между двумя макромолекулами, находящимися на расстоянии x_{jk} друг от друга; a_i — корни силовой характеристики. Силовая характеристика имеет две составляющие: позиционную и скоростную; A —

коэффициент позиционной составляющей; f — коэффициент внутреннего демпфирования. Расчеты показывают, что если внутреннее демпфирование не учитывать, то интегрирование уравнений динамики сжатия (1) оказывается практически невозможным. Пара значений (A, f) — искомая характеристика материала фторопласт Ф-4 в данной его интерпретации. Оценка этих значений — цель настоящей работы.

Предполагается, что при сильном сжатии макромолекулы могут подойти друг к другу как угодно близко. Поэтому следует учитывать возможное взаимодействие каждой пары молекул. Принято, что молекулы начинают взаимодействовать, как только они приближаются на расстояние меньше, чем два периода расчетной решетки, равного l . Логика такого взаимодействия определяется функцией $\text{step}(\cdot)$, которая представляет собой кубический полином:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (5)$$

$$x \in [2sl, 2l]; s \in (0,5; 1,0);$$

$$a = \frac{1}{pl^3}; b = -\frac{3(1+s)}{2pl^2};$$

$$c = \frac{3s}{pl}; d = \frac{1-3s}{2p}; p = -\frac{(s-1)^3}{2},$$

где s — параметр, характеризующий темп убывания позиционной силовой характеристики макромолекулы в интервале $[l, 2l]$.

На рисунке 7 представлена позиционная силовая характеристика макромолекулы. Традиционно в методе частиц силовую характеристику считают унимодальной и монотонной (см. потенциал Леннарда–Джонса, потенциал Мизеса, потенциал Ми [4]). Такая силовая характеристика свойственна не твердым телам, а реальным газам [5]. В работе [2] показано, что использование монотонной характеристики делает невозможным обеспечение исходного устойчивого состояния статического равновесия модели (возникает эффект усадки). Поэтому в настоящей статье предложена так называемая 7-корневая силовая характеристика модели. В соответствии с ней, в начальный момент времени в состоянии статического равновесия оказываются макромо-

лекулы, находящиеся на расстояниях l , $l\sqrt{2}$, $l\sqrt{3}$ и $2l$ друг от друга (это ближайшие макромолекулы, расположенные по прямой и по двум диагоналям расчетной решетки). Указанные четыре состояния статического равновесия должны быть устойчивы, в них производная силовой характеристики положительна (см. рис. 7). Чтобы обеспечить в указанных точках производную кривой требуемого знака, необходимы еще три промежуточных состояния статического равновесия (они взяты посередине между указанными основными корнями (см. рис. 7)):

$$a_1 = l; a_2 = \frac{l(\sqrt{2} + 1)}{2}; a_3 = l\sqrt{2}; a_4 = \frac{l(\sqrt{2} + \sqrt{3})}{2};$$

$$a_5 = l\sqrt{3}; a_6 = \frac{l(\sqrt{3} + 2)}{2}; a_7 = 2l. \quad (6)$$

В формуле (4) силовая характеристика представлена в степенной форме как произведение двучленов. Параметр p характеризует темп нарастания силовой характеристики, а параметр s в формуле (5) — степень ее убывания.

На рисунке 8 приведены результаты моделирования процесса сильного сжатия фторопласта Ф-4 в среде MSC.Adams. Разрушение образца происходит по всему объему. Детальное рассмотрение показывает, что практически образец разрушается («лопается») симметрично диагональной плоскости бруска, имеющего форму параллелепипеда. Такое представление соответствует рис. 2.

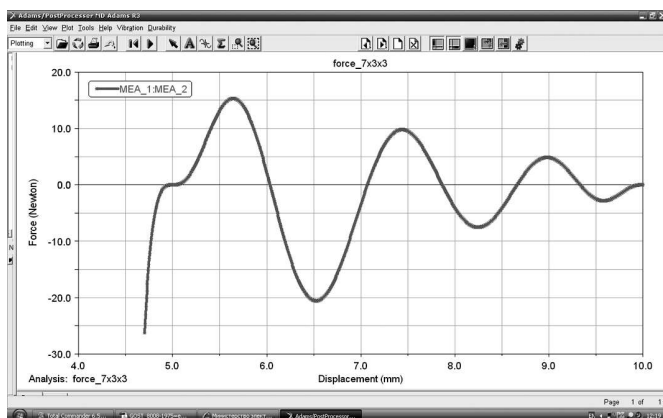


Рис. 7. Общий вид 7-корневой силовой характеристики макромолекулы для варианта расчета $7 \times 3 \times 3$ (63 макромолекулы)

На рисунке 9 показано сжатие бруска с локальным боковым дефектом, состоящим в том, что между четырьмя макромолекулами другого «волокна» взаимодействие обнулено. Видно, что в окрестности дефекта образовалась пустая область (трещина). Данное представление соответствует рис. 3.

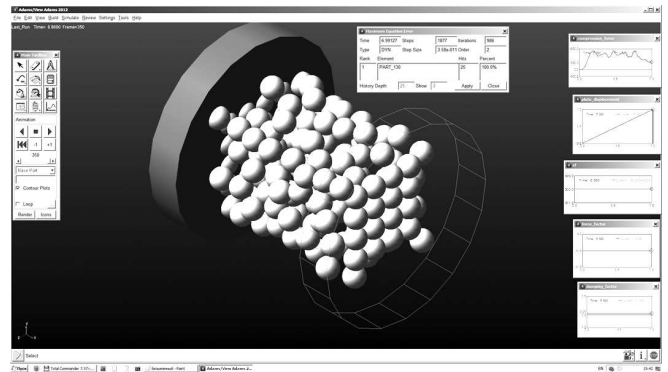


Рис. 8. Растрескивание модели $10 \times 4 \times 4$ без дефектов симметрично относительно диагональной плоскости

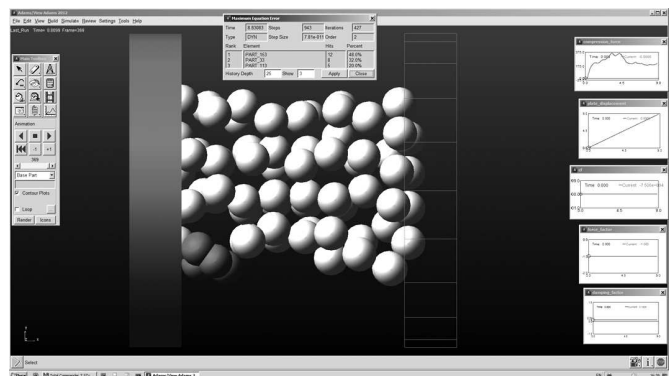


Рис. 9. Растрескивание модели $10 \times 4 \times 4$ с локальным боковым дефектом

Параметры силовой характеристики макромолекулы выбирались так, чтобы расчетная кривая сжатия образца была как можно ближе к экспериментальной кривой (см. рис. 5). На рисунке 10 дано сравнение расчетной кривой сжатия и экспериментальной кривой сжатия для модели из 16 молекул (вариант $4 \times 2 \times 2$). В данном расчете перестройка подструктур модели в процессе сжатия выражена слабо. Кривые достаточно близки.

На рисунке 11 приведено сравнение экспериментальной кривой сжатия и расчетной кривой сжатия для модели из 160 молекул (вариант $10 \times 4 \times 4$). Рассмотрен случай интенсивной пере-

стройки подструктур макромолекул при сильном сжатии. Даже при медленном движении рабочей пластины лабораторной машины процесс сжатия очень динамичный. Расчетные кривые сжатия имеют колебательный характер.

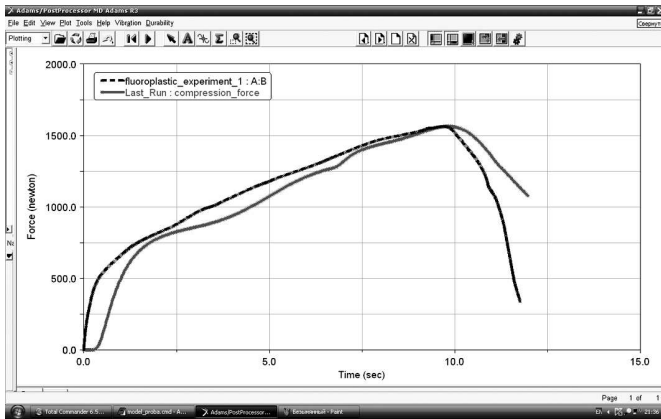


Рис. 10. Сравнение расчетной (—) и экспериментальной (- - -) кривых сильного сжатия для модели из 16 макромолекул (вариант 4×2×2)

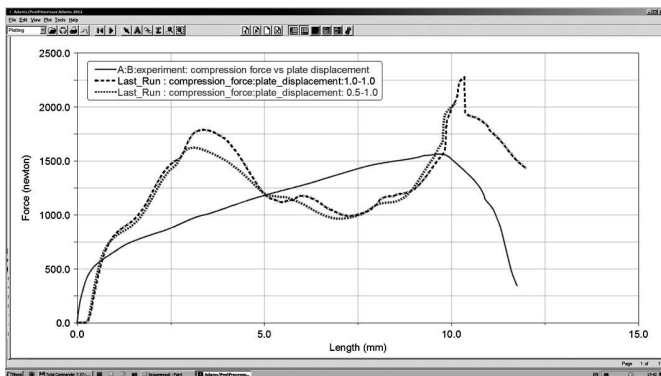


Рис. 11. Сравнение экспериментальной (—) и расчетных (- - -) кривых сильного сжатия модели из 160 макромолекул (вариант 10×4×4)

Следует ожидать, что с увеличением числа макромолекул модели степень изменяемости кривой будет убывать.

Оценки значений расчетных параметров материала фторопласт Ф-4 для варианта 10×4×4: $A = 1,0 \dots 10,0$ Н/мм², $f = 0,1 \dots 1,0$ Н·с/мм, $B = 5\,000 \dots 50\,000$ Н·с/мм, $s = 0,5 \dots 0,99$, $p = 2$, $l = 3,3333$ мм, плотность фторопласта $\rho = 2\,200 \cdot 10^{-9}$ кг/мм³, радиус макромолекулы $R = 1,648$ мм.

Отметим, что формирование и численное интегрирование системы уравнений динамики

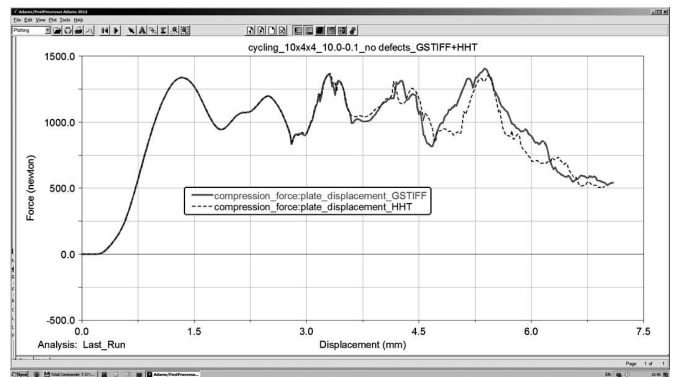


Рис. 12. Сравнение точности интегрирования уравнений динамики сжатия методом Гира (—) и методом Хилбера–Хьюджеса–Тейлора (- - -)

сжатия (1) представляет большие трудности. Для решения задачи необходима разработка особой программы на языке View Command Language пакета MSC.Adams. При этом определяющим является количество связей между макромолекулами, равное $n(n - 1)/2$. Так, для модели с 160 молекулами количество связей равно $160 \cdot (160 - 1)/2 = 12\,720$.

Для расчета этого варианта необходима работа компьютера с 64-битной операционной системой и объемом оперативной памяти 24 Гб в течение 1 ч.

На рисунке 12 представлено сравнение результатов интегрирования уравнений динамики сжатия (1) двумя разными методами: методом Гира и методом Хилбера–Хьюджеса–Тейлора [6]. Рассмотрен вариант, когда перестройка подструктур бруска при сжатии происходит особенно динамично.

Выводы

1. Гипотеза сплошности среды в задаче деформируемого твердого тела не используется. Сжимаемый брусок моделируется набором сравнительно небольшого числа макромолекул.

2. Предложена 7-корневая силовая характеристика макромолекулы, обеспечивающая состояние статического равновесия макромолекул в узлах исходной расчетной решетки.

3. Показано, что процесс сжатия имеет колебательный характер. При этом рассматриваемая система макромолекул последовательно

переходит из одного состояния статического равновесия в другое.

Литература

1. Advances in the particle finite element method (PFEM) for solving coupled problems in engineering / E. Onate E, S.R. Idelsohn, M.A. Celigueta et al. // International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Technical University of Catalonia (UPC), Campus Norte UPC, 08034 Barcelona, Spain, 2011. 45 p.
2. Аринчев С.В., Yuri Sillano. Моделирование процесса разрыва стального бруска методом частиц в среде MSC.Adams // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 6. С. 39–45.
3. Фторопласт Ф-4. ТУ 6–05–810–88.
4. Кривоцов А.М., Кривоцова Н.В. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. 2002. Т. 3. № 2. С. 254–276.
5. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 1. Механика, колебания, волны и молекулярная физика. М.: Наука, 1970. 512 с.
6. Lapidus Leon, Seinfeld John H. Numerical Solution of Ordinary Differential Equations. New York, London: Academic Press, 1971. 299 p.

Reference

1. Onate E., Idelsohn S.R., Celigueta M.A., Rossi R., Marti J., Carbonell J.M., Ryzakov P., Suarez B. *Advances in the particle*

finite element method (PFEM) for solving coupled problems in engineering. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Technical University of Catalonia (UPC), www.cimne.com. Campus Norte UPC, 08034 Barcelona, Spain, 2011. 45 p.

2. Arinchev S.V., Sillano Yuri. Modelirovanie protsessa razryva stal'nogo bruska metodom chastits v srede MSC.Adams [Modeling of steel bar fracture process by method of particles in MSC.Adams]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 6, pp. 39–45.
3. Ftoroplast F-4. *Tekhnicheskie usloviia 6–05–810–88* [Fluoroplastic F-4. Specifications 6–05–810–88].
4. Krivtsov A.M., Krivtsova N.V. Metod chastits i ego ispol'zovanie v mekhanike deformiruемого tverdogo tela [Method of particles and its application to mechanics of solids] *Dal'nevostochnyi matematicheskii zhurnal DVO RAN* [Far Eastern Mathematical Journal], 2002, vol. 3, no. 2, pp. 254–276.
5. Savel'ev I.V. *Kurs obshchei fiziki. Mekhanika, kolebaniia, volny i molekuliarnaia fizika* [Physics course. Mechanics, oscillations, waves, and molecular physics]. Vol. 1. In 3 vol. Moscow, Nauka publ., 1970. 512 p.
6. Lapidus Leon, Seinfeld John H. *Numerical Solution of Ordinary Differential Equations*. Mathematics in Science and Engineering, vol. 74, Academic Press, New York, London, 1971, 299 p.

Статья поступила в редакцию 03.02.2013

Информация об авторе

АРИНЧЕВ Сергей Васильевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Information about the author

ARINCHEV Sergey Vasilievich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Aerospace Systems» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: arinchev@inbox.ru).