

Технология и технологические машины



АРИНЧЕВ

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

ARINCHEV

Sergey Vasil'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



БУКЕТКИН

Борис Васильевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

BUKETKIN

Boris Vasil'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

УДК 534.1

Моделирование процесса кручения стержня из фторопласта методом частиц

С.В. Аринчев, Б.В. Букеткин

Для выполнения расчетов конструкций современных летательных аппаратов, работающих в крайне тяжелых условиях, в ряде случаев необходимо отказаться от гипотезы сплошности деформируемой среды и использовать метод частиц. В статье рассмотрен вариант метода частиц применительно к задаче сильного кручения стержня, когда элемент конструкции моделируется набором сравнительно небольшого числа макромолекул. В экспериментальной части работы партия образцов из фторопласта Ф-4 размерами 30×10×10 мм скручивалась в испытательной машине до разрушения. Построена представительная экспериментальная диаграмма кручения образца, выполнено электронное микрофотографирование сечения разрыва. В расчетной части макромолекулярная модель построена с помощью программных средств пакета MSC.Adams. Показано, что силовую характеристику макромолекулы фторопласта Ф-4 можно подобрать так, чтобы расчетная кривая кручения материала образца и экспериментальная кривая были достаточно близки.

Ключевые слова: диаграмма кручения, силовая характеристика макромолекулы, макромолекулярная модель.

Modeling of torsion of a Teflon rod by the method of particles

S.V. Arinchev, B.V. Buketkin

The structures of modern aircrafts operate under extreme conditions. To calculate such structures, in some cases, the continuity hypothesis should not be admitted for a deformable medium. The method of particles meets these requirements. The article deals with the application of the method of particles to the problem of strong torsion of a rod when the structural element is represented by a relatively small set of macromolecules. The work consists of experimental and computational parts. In the experimental part, the 30×10×10 mm Teflon sample

party is twisted in a testing machine until failure. A representative experimental sample torsion diagram is constructed, and the electronic microscope is used to investigate the failure section. In the computational part, a macromolecular model is constructed using the MSC.Adams software package. It is shown that the power characteristic of a Teflon macromolecule can be chosen so that the calculated and experimental torsion curves coincide very closely. The results of the experiments can be used for designing expendable aircrafts.

Keywords: torsion diagram, power characteristic of a macromolecule, macromolecular model.

Метод частиц очень актуален и имеет большие перспективы. Современное состояние метода представлено в работе [1]. Отметим, что основные результаты здесь получены в области динамики жидкостей и сыпучих сред. Проблемы деформирования твердых тел из современных конструкционных материалов изучены недостаточно. Особый интерес представляет работа [2], в которой адаптивным методом сглаженных частиц рассмотрена задача механической обработки (строгания) стали марки С45Е (Германия).

В настоящей статье используется вариант метода частиц, предложенный в работах [3, 4]. При этом частица рассматривается как точечная «макромолекула» с заданной силовой характеристикой. В эксперименте использовался широко распространенный конструкционный материал невысокой прочности — фторопласт Ф-4. Характеристики данного материала приведены в работе [5].

Настоящее исследование состоит из двух частей: экспериментальной и теоретической. Эксперимент выполнялся в лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Опытный образец, скрученный на испытательной машине, показан на рис. 1. Для численного моделирования используется срединная часть образца, имеющая форму параллелепипеда размерами 30×10×10 мм. Закрепление образца в захватах испытательной машины кручения INSTRON двумя захватами изображено на рис. 2. Левый захват пассивный. Правый захват вращается с заданной угловой скоростью. Продольное усилие отсутствует.



Рис. 1. Опытный образец, скрученный на испытательной машине INSTRON, и его срединная часть, используемая для численного моделирования

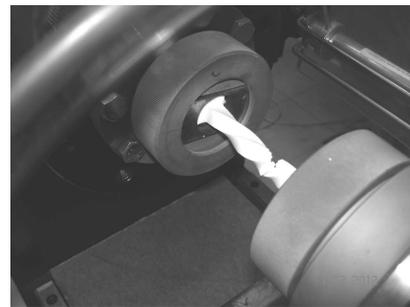


Рис. 2. Скручивание опытного образца в испытательной машине двумя захватами

Использовалась серия из пяти опытных образцов. Все образцы вырезаны от одной заготовки. Семейство экспериментальных диаграмм кручения образцов (зависимости приложенного к образцу крутящего момента от угла поворота подвижного захвата) приведено на рис. 3. На рисунке видно, что полученные кривые кручения имеют существенный случайный разброс. С увеличением угла случайный разброс возрастает. Из полученного семейства выбрана одна представительная диаграмма кручения (рис. 4),

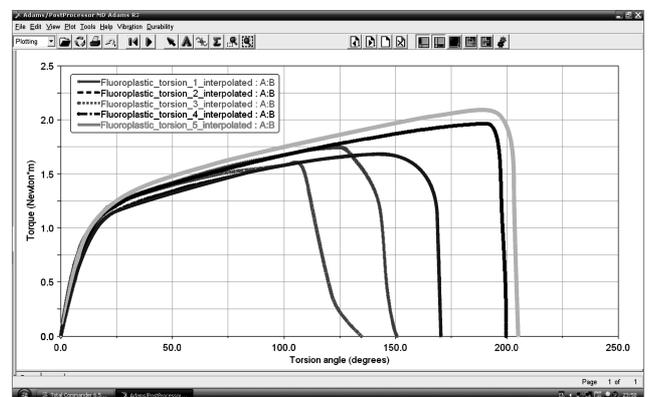


Рис. 3. Семейство экспериментальных диаграмм кручения образца (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

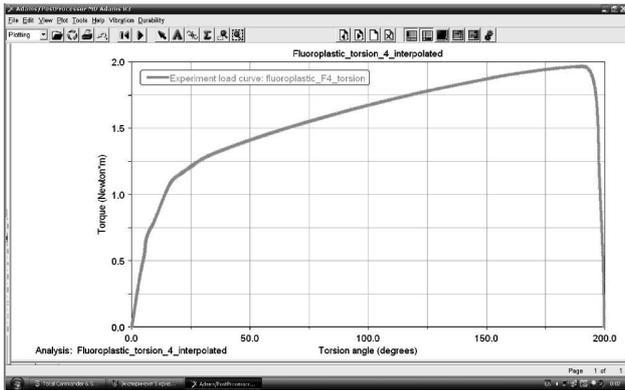


Рис. 4. Представительная экспериментальная диаграмма кручения образца (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

которая используется для численного моделирования: силовая характеристика макромолекулы выбирается так, чтобы экспериментальная кривая кручения и расчетная кривая кручения были как можно ближе друг к другу. Поверхности разрушения образцов изучались на электронном микроскопе кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Характерные результаты электронного микроскопирования представлены на рис. 5.

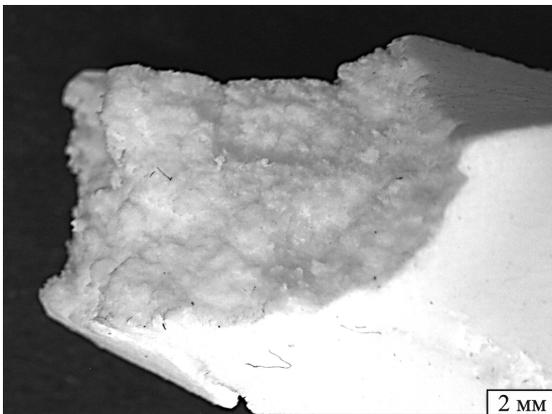


Рис. 5. Микроскопирование рельефа поверхности разрушения при скручивании опытного образца

В расчетной части моделируется процесс кручения стержня в пакете MSC.Adams. Исходная недеформированная расчетная модель, состоящая из $4 \times 2 \times 2 = 16$ макромолекул фторопласта, изображена на рис. 6. Макромолекулы фторопласта расставлены в узлах расчетной кубической решетки с шагом l . Слева и справа показаны (полупрозрачные) захваты испытательной машины кручения. Захват в пакете MSC.Adams

представляет собой абсолютно жесткое тело, имеющее форму квадратной рамки заданной толщины. Ширина рамки превышает диаметр макромолекулы. Четыре макромолекулы крайнего сечения стержня (с каждой его стороны) размещаются в захвате без зазора. Макромолекула имеет форму шара. При вращении захвата между его внутренними плоскими поверхностями и сферическими поверхностями макромолекул возникает контактное взаимодействие, которое задается стандартной процедурой CONTACT пакета MSC.Adams. Левый захват крепится к неподвижной опоре упруго-демпфирующим крутильным силовым элементом. Значение коэффициента углового демпфирования данного силового элемента настолько велико, что захват практически неподвижен. Момент, возникающий в данном силовом элементе, является крутящим моментом стержня, используемым для построения расчетной кривой кручения. Правый захват вращается с заданной постоянной угловой скоростью, равной 15 град/с. В отличие от контактного взаимодействия с захватом, между собой макромолекулы взаимодействуют как материальные точки. Каждая молекула взаимодействует с каждой в соответствии с выбранной силовой характеристикой (см. далее). Линии взаимодействия макромолекул приведены на рис. 6.

Расчеты показывают, что кручение (вопреки традиционным представлениям) не является непрерывным монотонным статическим процессом, а представляет собой последовательность скачкообразных переходов рассматриваемой системы макромолекул из одного состоя-

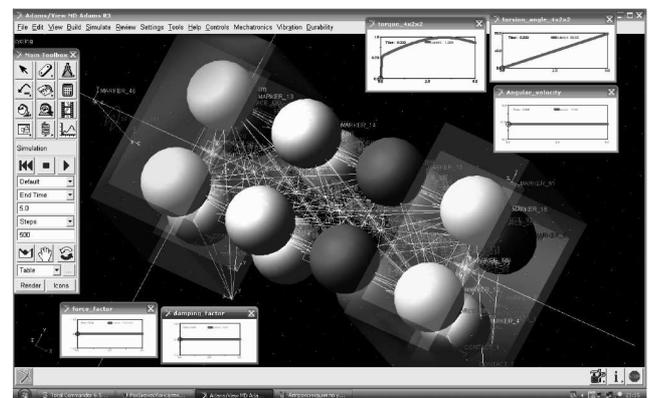


Рис. 6. Расчетная модель стержня, состоящая из $4 \times 2 \times 2 = 16$ макромолекул (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

ния статического равновесия в другое. При кручении одни подструктуры макромолекул разрушаются, а новые подструктуры образуются. Процесс перехода из одного состояния статического равновесия в другое является крайне динамичным. Его изучение требует составления уравнений динамики кручения, формирования задачи Коши с начальными условиями и ее интегрирования.

Уравнения динамики кручения рассматриваемой системы макромолекул фторопласта имеют вид

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

где n — число макромолекул модели; m_j — масса макромолекулы; \mathbf{r}_j — радиус-вектор макромолекулы; \mathbf{F}_{jk} — силовая характеристика макромолекулы; $\mathbf{F}_{j \text{ left}}$ и $\mathbf{F}_{j \text{ right}}$ — силы контактного взаимодействия частицы с захватом, определяемые в пакете MSC.Adams.

При отсутствии вращения макромолекул сила взаимодействия между двумя макромолекулами, находящимися на расстоянии x_{jk} друг от друга,

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

Здесь 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 кручения (1) оказывается практически невозможным. Пара значений (A, f) является искомой характеристикой материала фторопласт Ф-4 в данной его интерпретации.

Принято, что молекулы начинают взаимодействовать, как только они приближаются на расстояние меньше, чем два периода расчетной решетки, равного l . Такое взаимодействие является «коротким». Его логика определяется функцией $\text{step}(\cdot)$ — стандартной функцией внутреннего языка программирования пакета MSC.Adams. Данная функция представляет собой кубичный полином:

$$\begin{aligned} y &= ax^3 + bx^2 + cx + d, & (3) \\ x &\in [2sl, 2l], \quad s \in (0.5, 1.0), \\ a &= \frac{1}{Al^3}; \quad b = -\frac{3(1+s)}{2Al^2}; \\ c &= \frac{3s}{Al}; \quad d = \frac{1-3s}{2A}; \quad A = -\frac{(s-1)^3}{2}, \end{aligned}$$

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

Традиционно в методе частиц силовую характеристику считают унимодальной и монотонной [6]. Однако использование традиционной монотонной характеристики делает невозможным обеспечение исходного устойчивого состояния статического равновесия модели. Поэтому в настоящей статье используется так называемая 7-корневая силовая характеристика модели [3, 4]. Общий вид позиционной составляющей силовой характеристики макромолекулы представлен на рис. 7. В соответствии с ней в начальный момент времени в состоянии статического равновесия оказываются макромолекулы, находящиеся на расстояниях $l, l\sqrt{2}, l\sqrt{3}$ и $2l$ друг от друга (ближайшие макромолекулы, расположенные по прямой и по двум диагоналям расчетной решетки). Указанные четыре состояния статического равновесия должны быть устойчивы, т. е. 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 посе-

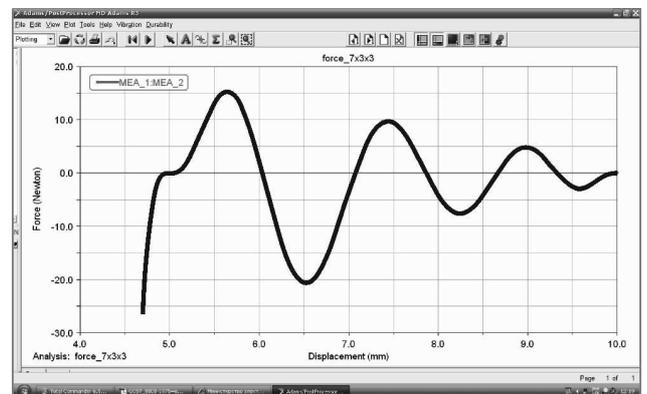


Рис. 7. Общий вид 7-корневой силовой характеристики макромолекулы для варианта расчета $7 \times 3 \times 3$ (63 макромолекулы) (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

редине между указанными основными корнями-ми). Таким образом, имеем

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

$$a_5 = l\sqrt{3}; a_6 = \frac{l(\sqrt{3} + 2)}{2}; a_7 = 2l. \quad (4)$$

В формуле (2) силовая характеристика представлена в степенной форме как произведение двучленов. В формуле (3) параметр p характеризует темп нарастания силовой характеристики, а параметр s — темп ее убывания. Этими параметрами можно управлять.

Следует отметить, что предлагаемая модель является весьма громоздкой. Ее сложность быстро растет с увеличением порядка макромолекулярной аппроксимации. Определяющим здесь является количество связей между макромолекулами, равное $n(n - 1)/2$. Так, для модели с $10 \times 4 \times 4 = 160$ молекулами (рис. 8) число межмолекулярных связей равно $160(160 - 1)/2 = 12\,720$. Поэтому для решения задачи необходима разработка особой программы на внутреннем языке View Command Language пакета MSC.Adams.

Результаты численного моделирования процесса скручивания стержня из фторопласта представлены на рис. 9. Интегрирование уравнений динамики кручения (1) выполнялось тремя разными методами: методом Гира, методом Хилбера–Хьюджеса–Тейлора и методом Ньюмарка. Результаты интегрирования практически совпали, соответствующие три кривые на рис. 9 практически сливаются в одну. Отметим, что рассматриваемое взаимодействие является «коротким». Поэтому при расчете разру-

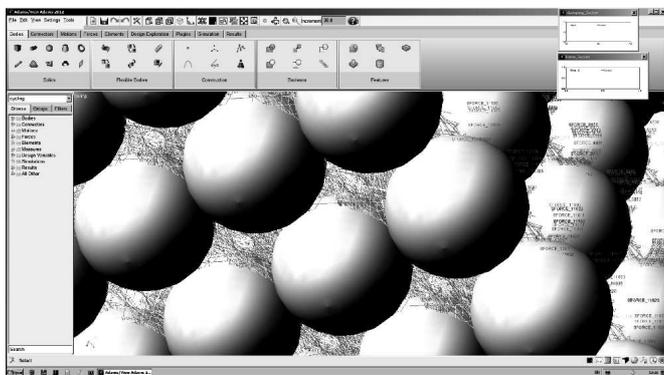


Рис. 8. Межмолекулярные связи модели, содержащей $10 \times 4 \times 4 = 160$ макромолекул (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

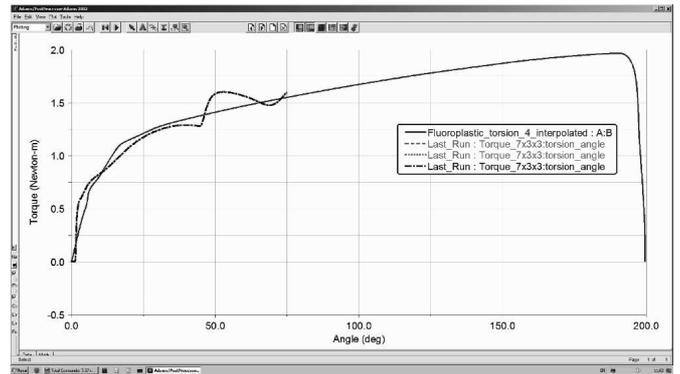


Рис. 9. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых кручения стержня, содержащего $7 \times 3 \times 3 = 63$ макромолекулы (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

шение стержня (падение момента кручения до нуля) наступает существенно раньше, чем в эксперименте. Оценки значений расчетных параметров фторопласта Ф-4 для варианта $7 \times 3 \times 3 = 63$: $A = 0,1 \text{ Н/мм}^9$, $f = 3,7 \text{ Н·с/мм}$, $s = -0,99$, $p = 2$, $l = 5,0 \text{ мм}$, плотность фторопласта $\rho = 2\,200 \cdot 10^{-9} \text{ кг/мм}^3$, радиус макромолекулы $R = 2,248 \text{ мм}$.

Результат численного моделирования кручения модели стержня, содержащего $10 \times 4 \times 4 = 160$ макромолекул, представлен на рис. 10. Рассматриваемая картина разрушения характерна для повышенных значений коэффициента A позиционной составляющей силовой характеристики макромолекулы. Видно, что область разрушения (локализованная в окрестности левого неподвижного захвата) имеет протяженный характер, соот-

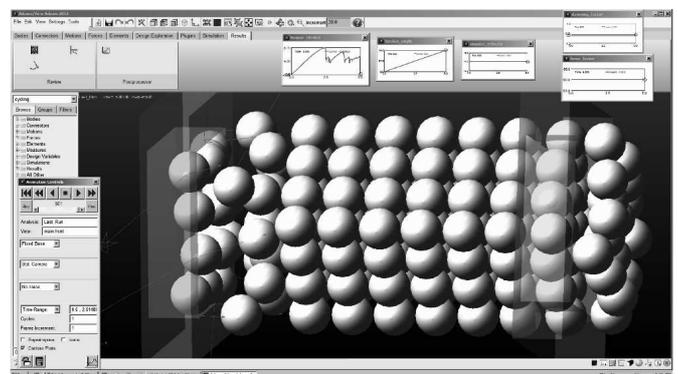


Рис. 10. Моделирование процесса кручения модели, содержащий $10 \times 4 \times 4 = 160$ молекул с повышенными значениями коэффициента A позиционной составляющей силовой характеристики макромолекулы (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

ветствующий приведенному на рис. 5. Численное скручивание модели $10 \times 4 \times 4 = 160$ до момента разрушения на компьютере с 64-битной операционной системой и 24 Гб оперативной памяти требует примерно 2,5 ч машинного времени.

Выводы

1. Предложена макромолекулярная аппроксимация процесса скручивания стержня из фторопласта Ф-4. Показано, что силовую характеристику макромолекулы можно подобрать так, чтобы экспериментальная диаграмма кручения и расчетная диаграмма кручения были достаточно близки.
2. Расчеты показывают, что с увеличением порядка макромолекулярной аппроксимации вычислительные затраты быстро растут. Анализ сходимости результатов вычислений требует существенного увеличения числа молекул и распараллеливания вычислений.

Литература

- [1] *Proceedings of the III International Conference on Particle-Based Methods — Fundamentals and Applications Particles-2013*, 18–20 September 2013, University of Stuttgart, Publication of the International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Ebook. URL: <http://congress.cimne.com/particles2013/frontal/doc/Ebook%20Particles%202013.pdf> (дата обращения 20 ноября 2013).
- [2] Fabian Spreng, Alexandra Mueller, Peter Eberhard The introduction of a bi-adaptive smoothed particle hydrodynamics formulation beneficial for machining process simulation. (CIMNE) *Proceedings of the III International Conference on Particle-Based Methods — Fundamentals and Applications Particles-2013*, 18–20 September 2013, University of Stuttgart, Ebook, pp. 602–613. URL: <http://congress.cimne.com/particles2013/frontal/doc/Ebook%20Particles%202013.pdf> (дата обращения 20 ноября 2013).
- [3] Аринчев С.В. Моделирование процесса сильного сжатия фторопласта Ф-4 методом частиц в среде MSC.Adams. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2013, № 5, с. 3–9.
- [4] Arinchev S.V. Simulation of high-ratio compression of a parallelepipedal duralumin bar using the particle-based method and MSC.Adams software. (CIMNE) *Proceedings of the III International Conference on Particle-Based Methods —*

Fundamentals and Applications Particles-2013, 18–20 September 2013, University of Stuttgart, Ebook, pp. 670–680. URL: <http://congress.cimne.com/particles2013/frontal/doc/Ebook%20Particles%202013.pdf> (дата обращения 20 ноября 2013).

[5] Фторопласт Ф-4. ТУ 6–05–810–88.

[6] 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.

References

- [1] *Proceedings of the 3 International Conference on Particle-Based Methods — Fundamentals and Applications Particles-2013*, 18–20 September 2013, University of Stuttgart, Publication of the International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Germany, Stuttgart, Ebook. 978 p. Available at: <http://congress.cimne.com/particles2013/frontal/doc/Ebook%20Particles%202013.pdf> (accessed 20 November 2013).
- [2] Fabian Spreng, Alexandra Mueller, Peter Eberhard. The introduction of a bi-adaptive smoothed particle hydrodynamics formulation beneficial for machining process simulation. (CIMNE) *Proceedings of the 3 International Conference on Particle-Based Methods — Fundamentals and Applications Particles-2013*, 18–20 September 2013, University of Stuttgart, Ebook, pp. 602–613. Available at: <http://congress.cimne.com/particles2013/frontal/doc/Ebook%20Particles%202013.pdf> (accessed 20 November 2013).
- [3] Arinchev S.V. Modelirovanie protsessa sil'nogo szhatiia ftoroplasta F-4 metodom chastits v srede MSC.Adams [Simulation of Fluoroplastic F-4 Strong Compression Process by Method of Particles with MSC.Adams]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2013, no. 5, pp. 3–9.
- [4] Arinchev S.V. Simulation of high-ratio compression of a parallelepipedal duralumin bar using the particle-based method and MSC.Adams software. (CIMNE) *Proceedings of the 3 International Conference on Particle-Based Methods — Fundamentals and Applications Particles-2013*, 18–20 September 2013, University of Stuttgart, Ebook, pp. 670–680. Available at: <http://congress.cimne.com/particles2013/frontal/doc/Ebook%20Particles%202013.pdf> (accessed 20 November 2013).
- [5] *Ftoroplast F-4. Tekhnicheskie usloviia 6–05–810–88* [Fluoroplastic F-4. Technical Terms 6–05–810–88].
- [6] Krivtsov A.M., Krivtsova N.V. Metod chastits i ego ispol'zovan v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela [Method of particles and its application to mechanics of solids]. *Dal'nevostochny matematicheskii zhurnal DVO RAN* [Far Eastern Mathematical Journal]. 2002, vol. 3, no. 2, pp. 254–276.

Статья поступила в редакцию 29.11.2013

Информация об авторах

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).

БУКЕТКИН Борис Васильевич (Москва) — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

ARINCHEV Sergey Vasil'evich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Aerospace Systems» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: arinchev@inbox.ru).

BUKETKIN Boris Vasil'evich (Moscow) — Senior lecturer of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).