

# Технология и технологические машины

УДК 534.16


DOI 10.18698/0536-1044-2017-8-67-77

## Моделирование частотных испытаний пластины с помощью макромолекул

**С.В. Аринчев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Simulating Plate Frequency Response Using Micromolecules

**S.V. Arinchev**BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: arinchev@inbox.ru

**i** Использование в численных методах только гипотезы непрерывности деформирования материалов может затормозить развитие механики. Свободным от этой гипотезы является известный метод частиц. О состоянии метода частиц можно судить по публикациям журнала *Computational Particle Mechanics*, издаваемого с 2013 г., и по трудам международных конференций, проводимых один раз в два года Международным центром численных методов инженерии CIMNE (Барселона, Испания). К сожалению, подавляющее большинство исследований в этой области выполнено по механике гранулированных материалов и жидкостей. Работы по механике твердого тела практически отсутствуют. Вместе с тем область применения метода частиц в механике твердого тела огромна: это задачи механики разрушения, трещинообразования, теплообмена и изменения агрегатного состояния материала (3D-печать), задачи механической обработки материалов и т. д. Рассмотрен так называемый метод макромолекул — вариант метода частиц. Приведены результаты апробации этого метода на задаче о частотных испытаниях пластины. Исследования показали, что данные, полученные в эксперименте, при расчете в программном пакете MSC Nastran и при расчете методом макромолекул, хорошо согласуются.

**Ключевые слова:** метод частиц, силовая характеристика макромолекулы, частотные испытания пластины, амплитудно-частотная характеристика

**i** The adherence to the deformation-continuity hypothesis may retard development of mechanics; but the particle approach is free from this hypothesis. The current state of development of the particle approach may be evaluated by the articles published in the *Computational Particle Mechanics* journal, established in 2013, and the works of biennial international conferences organized by the International Centre for Numerical Methods in Engineering (Barcelona, Spain). Unfortunately, the vast majority of these studies are in the area of mechanics of granulated bulk materials and fluids. Works on solid mechanics are practically unavailable. At the same time, the particle approach has enormous potential in the solid mechanics application area: fracture mechanics, crack propagation, heat exchange,

changes of the material aggregate state (3D-printing), mechanical metal-working, etc. The so-called macromolecule approach, representing a variation of the particle approach, is discussed in this paper. The macromolecule-model simulation results obtained using the plate frequency response experiment are presented. The studies have shown that the experiment results, the results obtained using the MSC Nastran certified software, and the macromolecule-model simulation results are in a good agreement.

**Keywords:** particle approach, macromolecule force characteristic, plate frequency-response experiment, frequency-response characteristic

Метод макромолекул — это вариант известного метода частиц. Классические частицы имеют конечные размеры, а их взаимодействие — контактный характер. Неправильно считать, что макромолекула — объект наноуровня. Макромолекулы — обычные материальные точки, изучаемые теоретической механикой. Их взаимодействие задается специальной силовой характеристикой. Взаимодействие пропадает, как только расстояние между макромолекулами превышает некоторое пороговое значение. Преимущество метода макромолекул состоит в том, что потребное количество частиц сравнительно невелико. Метод частиц не требует использования гипотезы непрерывности деформирования. Так, разрушение материала (образование трещины) означает, что частицы просто оказались достаточно далеко друг от друга.

Цель работы — дополнительная апробация предлагаемого макромолекулярного подхода путем сравнения результатов расчета и эксперимента.

подавляющее большинство научных трудов по методу частиц посвящено механике сыпучих тел и жидкостей. Отметим, что в ряде случаев авторам бывает трудно перестроиться и перейти от непрерывной среды в дискретную. Так, в

работе [1] сделана попытка найти компромисс и объединить дискретное и континуальное рассмотрение. В статье [2] приведен алгоритм плотной упаковки сферических гранул из условия минимума занимаемого объема. В публикации [3] разработана методика расчета усилия контакта объемов, заполненных сыпучими гранулами, а в статье [4] смоделирован контакт мокрых частиц. В работе [5] рассмотрены особенности решения задач теплопроводности и массообмена методом частиц с помощью программного обеспечения со свободным доступом в сети, а в трудах [6, 7] — особенности поведения эллиптических частиц и частиц в форме многогранника. Отдельная частица имеет шесть степеней свободы, и ее вращение учитывается не всегда. В статье [8] разработана методика учета вращения частицы в уравнениях динамики.

Работы по методу частиц, относящиеся к механике твердого тела, как правило, рассматривают эффекты наноуровня. Так, в статье [9] представлена технология напыления высокоэнергетических ионов на металлическую поверхность. В работе [10] показано, как установить связь между нанопараметрами и макроскопическими континуальными характеристиками материала. В статье [11] на наноуровне исследованы особенности технологии обработки металла давлением для упрочнения поверхностного слоя. С другой стороны, в трудах [12–14] предложен макромолекулярный подход, приведены результаты его апробации на задаче моделирования процесса разрушения металлического бруска при знакопеременном кручении и на задаче его теплопроводности. Отметим работу [15], в которой метод конечных элементов (МКЭ) и метод частиц совместно использованы для решения задачи стружкообразования при точении металла.

В настоящей статье представлены результаты апробации метода макромолекул на задаче о частотных испытаниях стальной пластины массой  $M = 0,038$  кг и размерами  $0,12 \times 0,12 \times 0,0003$  м (рис. 1).

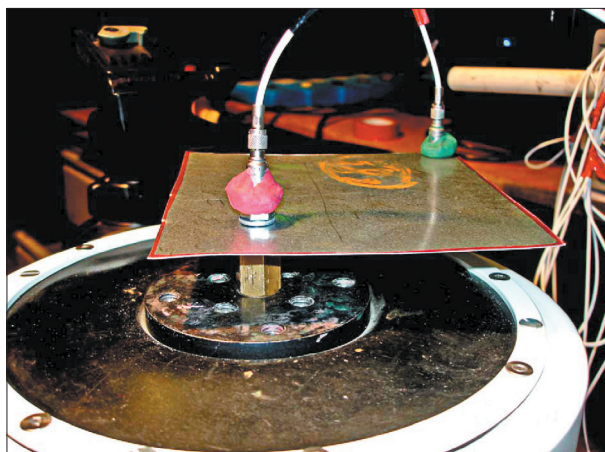


Рис. 1. Установка пластины на монтажной плите вибростенда фирмы DataPhysics

На рис. 1 показана пластина, установленная на монтажной плите вибростенда фирмы DataPhysics. Для частотных испытаний использованы одноосные датчики ускорений компании Kistler: управляющий (красный) и измерительный (зеленый). Датчики поставлены на пластилин. Масса датчика, равная 0,006 кг, соизмерима с массой пластины и учитывается в приведенных ниже уравнениях динамики. Кинематическое возбуждение с амплитудой вибраций 0,001 м передается на пластину через латунную втулку. Красный датчик, установленный на головку болта, отслеживает движения монтажной плиты вибростенда. Датчики измеряют составляющие ускорений пластины по вертикальной оси. Поэтому формы колебаний в плоскости, параллельной монтажной плите вибростенда, не рассматривались.

На рис. 2 показаны амплитудно-частотные (АЧХ, внизу) и фазочастотные характеристики (ФЧХ, сверху) колебаний пластины в диапазоне частот 10...50 Гц в местах установки датчиков. Красные кривые, отслеживающие поведение монтажной плиты вибростенда, соответствуют красному датчику, зеленые, контролирующие движение пластины, — зеленому. Как и следовало ожидать, при кинематическом возбуждении ускорение плиты растет по квадратной па-

раболе. Фаза красного датчика неизменна. Это фаза сравнения. Зеленые кривые показывают, что в рассматриваемом частотном интервале имеются две собственные частоты (два резонанса): изгибной тон с частотой 15,2 Гц и крутильный тон с частотой 39,1 Гц. Верхний крутильный тон с частотой 39,1 Гц выражен достаточно слабо, так как точка приложения внешнего кинематического возмущения и точка установки измерительного датчика находятся в окрестности узловой зоны соответствующей формы колебаний. Полученная зеленая АЧХ использована в качестве экспериментальной кривой сравнения при апробации метода макромолекул.

Результаты эксперимента протестированы путем решения соответствующей задачи (о частотном отклике пластины) МКЭ в программном пакете MSC Nastran. Общее число конечных элементов пластины составило  $12 \times 12 = 144$ . Учтено, что масса датчика ускорений соизмерима с массой пластины. На рис. 3 представлены рассчитанные формы изгибного и крутильного тонов колебаний пластины с частотой соответственно 16,88 и 37,46 Гц. Наличие нулевого тона обусловлено необходимостью моделирования вынуждающего поступательного движения опоры вибростенда. Колебания пластины

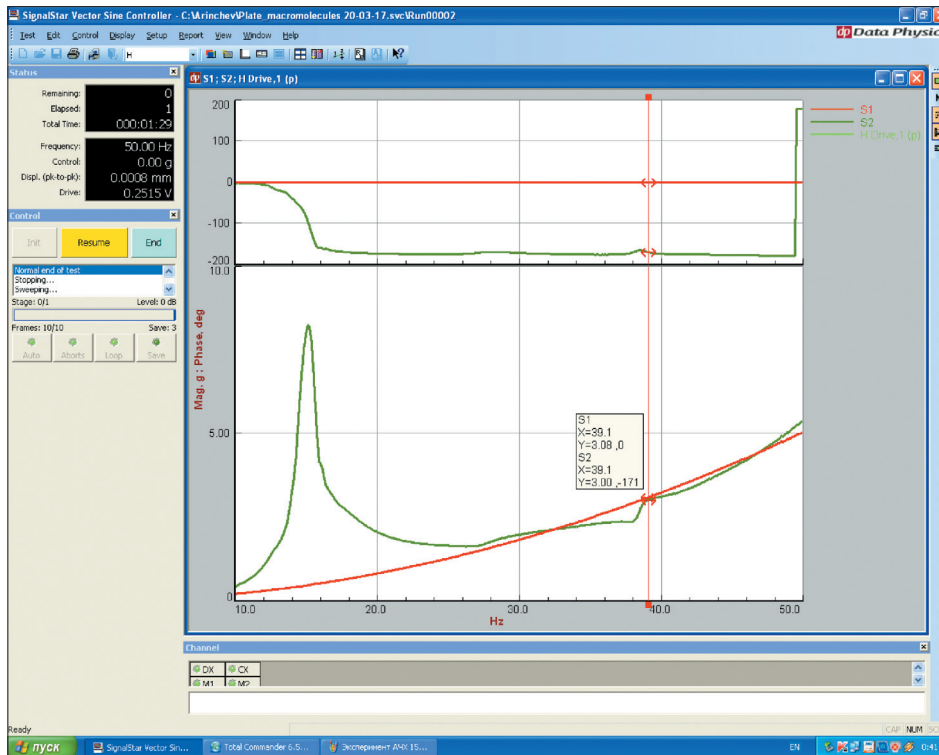
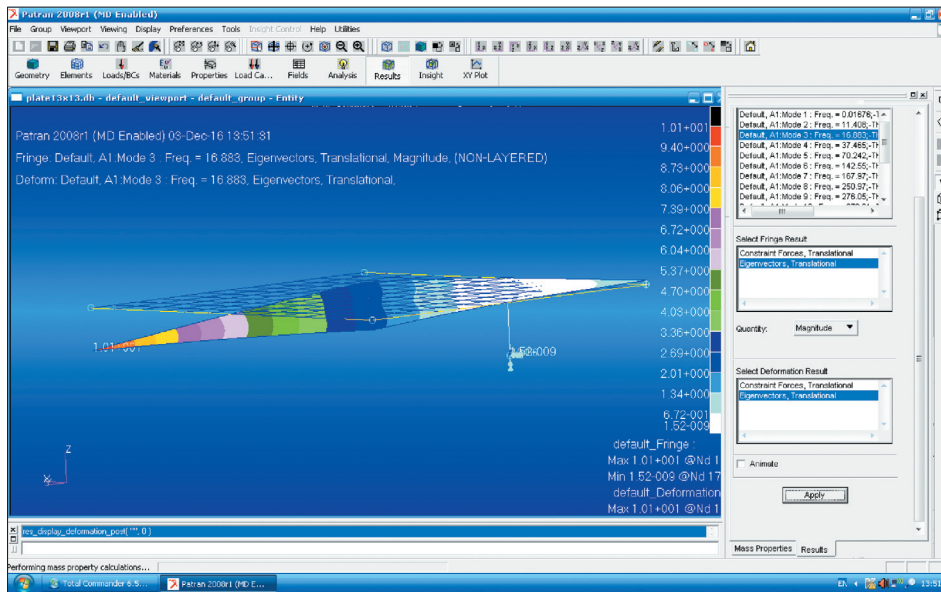
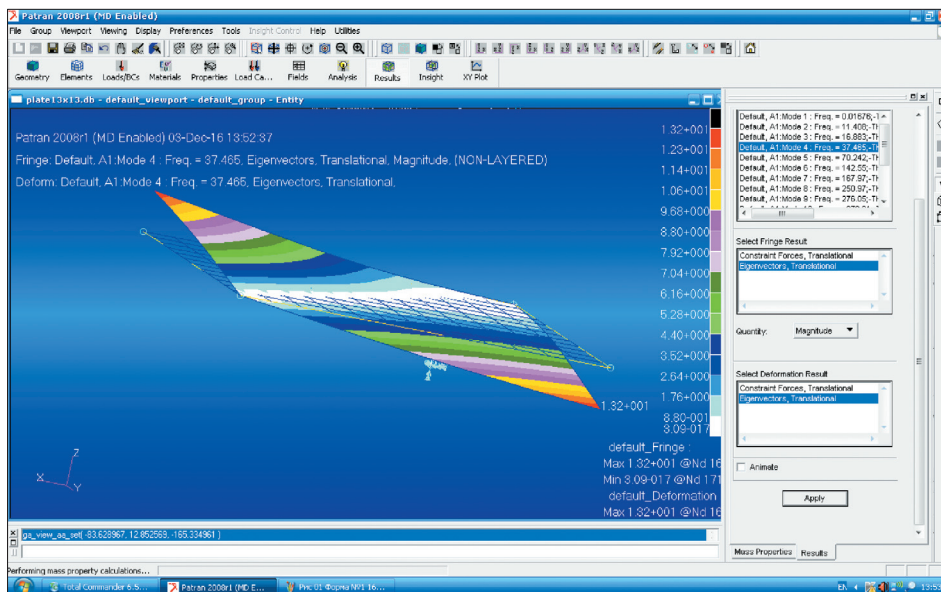


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ пластины, полученные в эксперименте



а



б

Рис. 3. Формы, полученные МКЭ в пакете MSC Nastran:  
 а — изгибного тона колебаний пластины с частотой 16,88 Гц;  
 б — крутильного тона колебаний пластины с частотой 37,46 Гц

с частотой, равной 11,40 Гц, происходят в плоскости, параллельной монтажной плите вибростенда, и в эксперименте не регистрировались.

На рис. 4 приведена АЧХ колебаний пластины в месте установки зеленого датчика, полученная МКЭ. Отметим, что МКЭ не позволяет выявить на данной кривой крутильный тон колебаний пластины с частотой 37,46 Гц, так как и точка возбуждения колебаний, и место установки датчика попадают в узловую зону формы (см. рис. 3, б, белая серединная область). Отметим, что результаты расчета МКЭ и стендового

эксперимента хорошо согласуются и являются достоверными. Эти результаты использованы для сравнения с данными анализа колебаний пластины методом макромолекул.

На рис. 5 показана типовая макромолекулярная модель пластины. Макромолекулы — это не наночастицы, а обычные материальные точки, которые расположены в узлах расчетной решетки. На рис. 5 показан вариант построения плоской модели рассматриваемой квадратной пластины из 25 одинаковых макромолекул. Масса каждой из них равна отношению массы



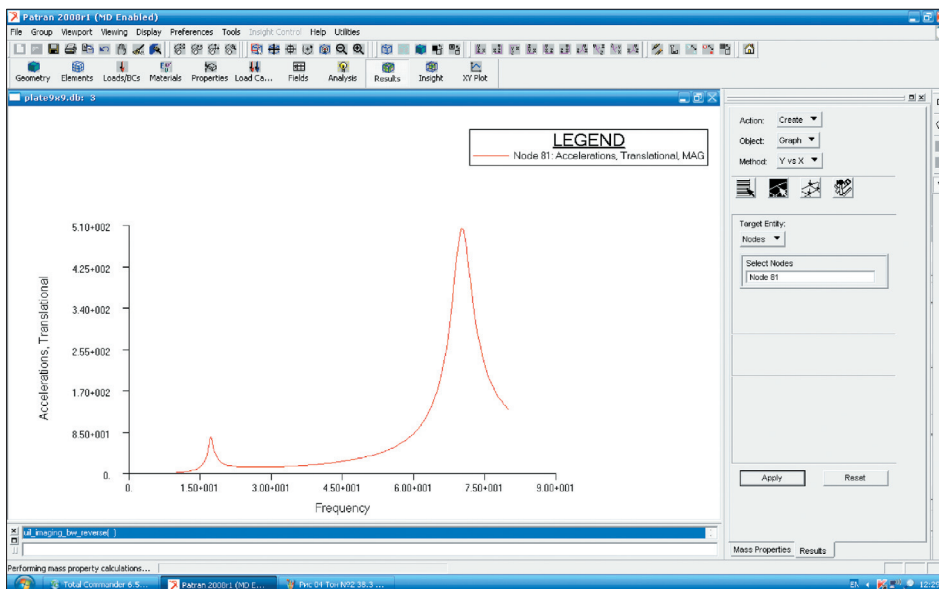


Рис. 4. АЧХ колебаний пластины в точке установки зеленого датчика, полученная МКЭ в пакете MSC Nastran

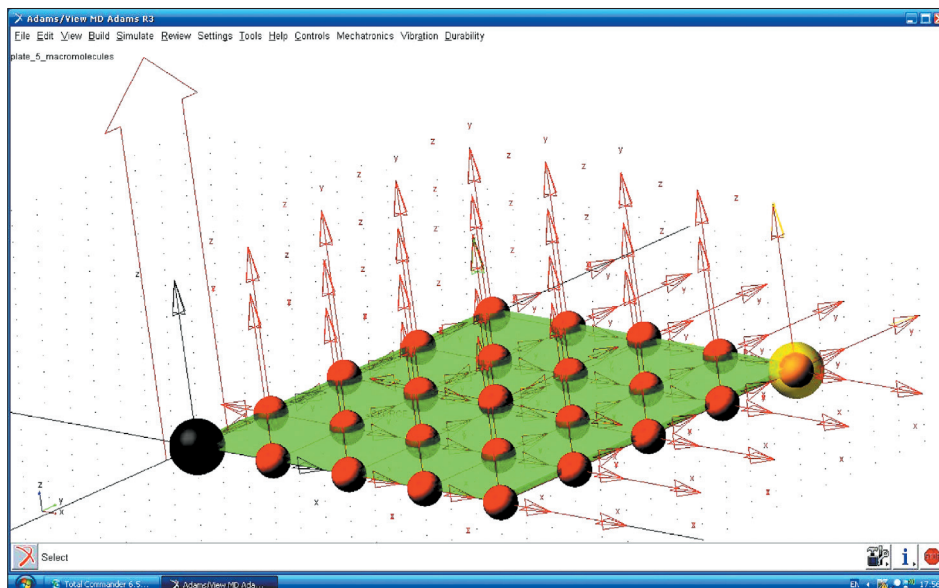


Рис. 5. Модель пластины, составленная из 25 макромолекул

пластины к числу макромолекул. При частотных испытаниях черная макромолекула в левом углу движется по заданному моногармоническому закону. Красно-желтая макромолекула в противоположном правом углу пластины учитывает установку там одноосного датчика ускорений (в соответствии с рис. 1). Взаимодействие макромолекул определяется их силовой характеристикой. Если расстояние между ними превышает некоторое пороговое значение, то взаимодействие пропадает. Каждая макромолекула имеет шесть степеней свободы. В данном конкретном случае вращения частиц запрещены. Рекомендации по составлению уравнений

динамики с учетом вращения частиц даны в работе [8].

Особенности задания силовой характеристики макромолекул детально изучены в работах [12–14]. В данной статье их не рассматривали. Принят простейший вариант так называемого «ближнего» взаимодействия: пороговое расстояние между макромолекулами равно двум шагам расчетной решетки. На рис. 5 шаг расчетной решетки  $a = l/4$ , где  $l$  — сторона пластины. При ближнем взаимодействии в плоскости пластины каждая макромолекула имеет трех так называемых представительных соседей. Поэтому силовая характеристика макро-

молекулы (для плоской решетки) должна иметь пять корней.

Пусть  $\mathbf{r}_{jk} = \{x_j - x_k; y_j - y_k; z_j - z_k\}$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ ;  $k=1, 2, \dots, n$ , — радиусы-векторы, определяющие взаимное положение макромолекул. Расстояние между макромолекулами  $r_{jk} = |\mathbf{r}_{jk}| = \sqrt{(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 + (z_k - z_j)^2}$ . Отметим, что решетка плоская, но макромолекулы движутся поступательно во всем трехмерном пространстве. Первая макромолекула перемещается по заданному моногармоническому закону  $x_1(t) = 0$ ;  $y_1(t) = 0$ ;  $z_1(t) = z_{01} \sin pt$ , где  $p$  — частота кинематического возбуждения, в соответствии с условиями рассматриваемых частотных испытаний. Согласно рекомендациям [12–14], пять корней силовой характеристики определяются по формулам

$$a_1 = a; \quad a_2 = a(1 + \sqrt{2})/2; \quad a_3 = a\sqrt{2}; \\ a_4 = a(\sqrt{2} + 2)/2; \quad a_5 = 2a.$$

Пятикорневую силовую характеристику макромолекулы (рис. 6) можно представить степенным полиномом

$$f_{jk} = \begin{cases} \frac{(r_{jk} - a_1)(r_{jk} - a_2)(r_{jk} - a_3)}{r_{jk}} \times \\ \times (r_{jk} - a_4)(r_{jk} - a_5) & \text{при } r_{jk} \leq 2a; \\ 0 & \text{при } r_{jk} > 2a. \end{cases}$$

Взаимодействие между макромолекулами обнуляется, как только расстояние между ними превышает два шага решетки. Сила взаимодей-

ствия неограниченно растет, если макромолекулы сближаются. В начальный момент времени вся решетка находится в состоянии статического равновесия.

Направляющие косинусы радиусов-векторов определяются выражениями

$$\cos \theta_{j k x} = (x_k - x_j)/r_{jk}; \\ \cos \theta_{j k y} = (y_k - y_j)/r_{jk}; \\ \cos \theta_{j k z} = (z_k - z_j)/r_{jk}.$$

Тогда уравнения динамики макромолекул плоской решетки в проекциях на оси координат (представляющие собой традиционные уравнения динамики системы материальных точек) имеют вид

$$-m_j \ddot{x}_j - \sum_{k=1}^{j-1} A f_{jk} \cos \theta_{j k x} + \\ + \sum_{k=j+1}^n A f_{jk} \cos \theta_{j k x} - d \dot{x}_j = 0; \\ -m_j \ddot{y}_j - \sum_{k=1}^{j-1} A f_{jk} \cos \theta_{j k y} + \\ + \sum_{k=j+1}^n A f_{jk} \cos \theta_{j k y} - d \dot{y}_j = 0; \\ -m_j \ddot{z}_j - \sum_{k=1}^{j-1} A f_{jk} \cos \theta_{j k z} + \\ + \sum_{k=j+1}^n A f_{jk} \cos \theta_{j k z} - d \dot{z}_j = 0; \quad j = 2, \dots, n,$$

где  $A$  — коэффициент жесткости силовой характеристики;  $d$  — коэффициент вязкого трения. Макромолекулы движутся поступательно, их

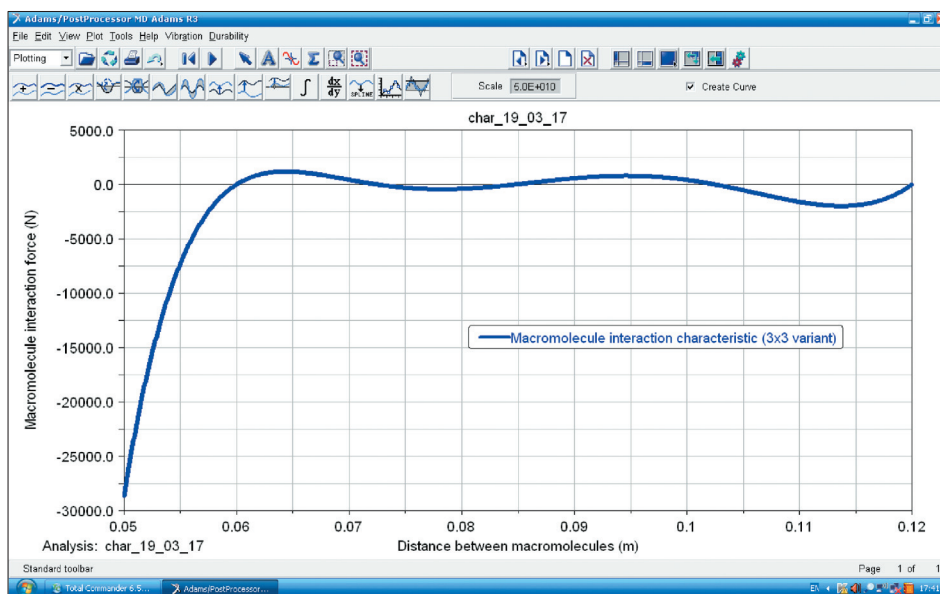


Рис. 6. Пятикорневая силовая характеристика макромолекулы

вращения запрещены. Учтено, что масса датчика ускорений соизмерима с массой пластины.

Начальные условия интегрирования, соответствующие рис. 6:

$$\begin{aligned} x_1 = \dots = x_5 &= 0; & x_6 = \dots = x_{10} &= a; \\ x_{11} = \dots = x_{15} &= 2a; & x_{16} = \dots = x_{20} &= 3a; \\ x_{21} = \dots = x_{25} &= 4a; & y_1 = y_6 = y_{11} = y_{16} = y_{21} &= 0; \\ y_2 = y_7 = y_{12} = y_{17} = y_{22} &= a; \\ y_3 = y_8 = y_{13} = y_{18} = y_{23} &= 2a; \\ y_4 = y_9 = y_{14} = y_{19} = y_{24} &= 3a; \\ y_5 = y_{10} = y_{15} = y_{20} = y_{25} &= 4a; & z_2 = \dots = z_{25} &= 0. \end{aligned}$$

Для всех прочих конкретных случаев они составляются аналогично. Преимущество метода макромолекул в том, что потребное количество

частиц сравнительно невелико. Рассмотрены два варианта расчета для моделей, содержащих  $2 \times 2 = 4$  и  $3 \times 3 = 9$  макромолекул.

Полученная задача Коши интегрировалась методом Рунге–Кутты четвертого порядка. Для заданной частоты возбуждения определялось максимальное смещение макромолекулы в заданном интервале времени. Строилась АЧХ, которая накладывалась на соответствующую экспериментальную кривую (рис. 2), и АЧХ, созданную МКЭ (рис. 4).

Авторская программа расчета написана на языке Фортран. Шаг интегрирования выбран из условия, что результат расчета не зависит от параметров вычислительной процедуры. На рис. 7

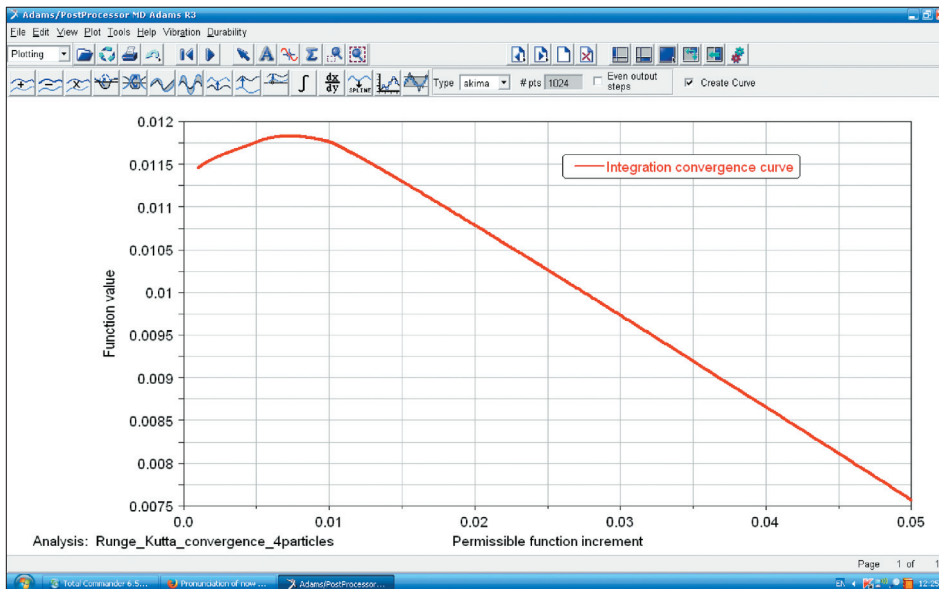


Рис. 7. Кривая сходимости процедуры интегрирования уравнений динамики методом Рунге–Кутты

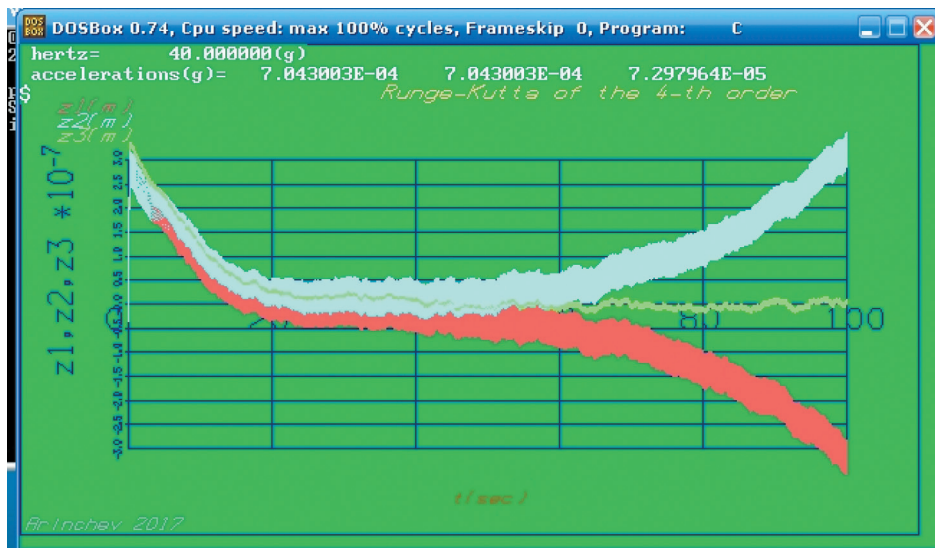
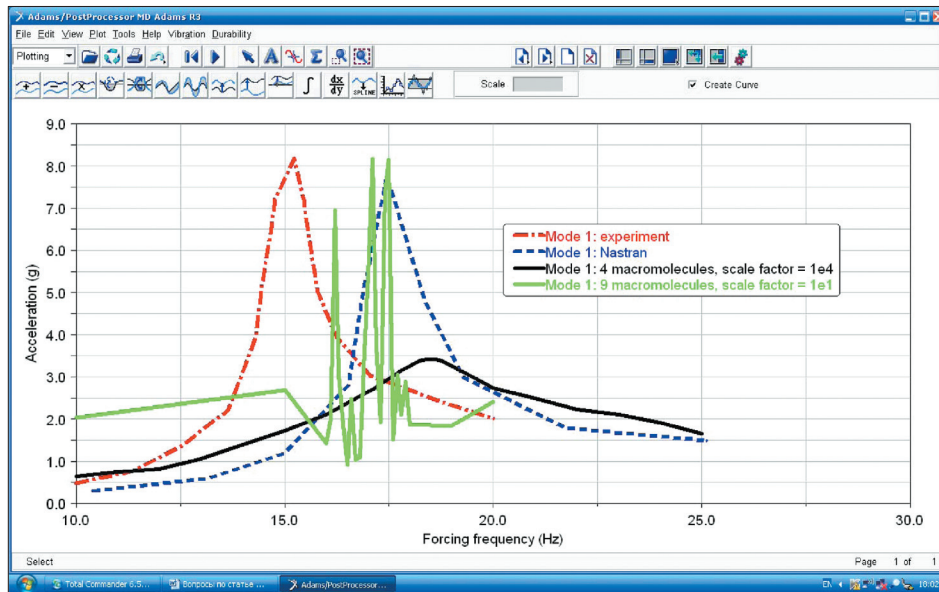
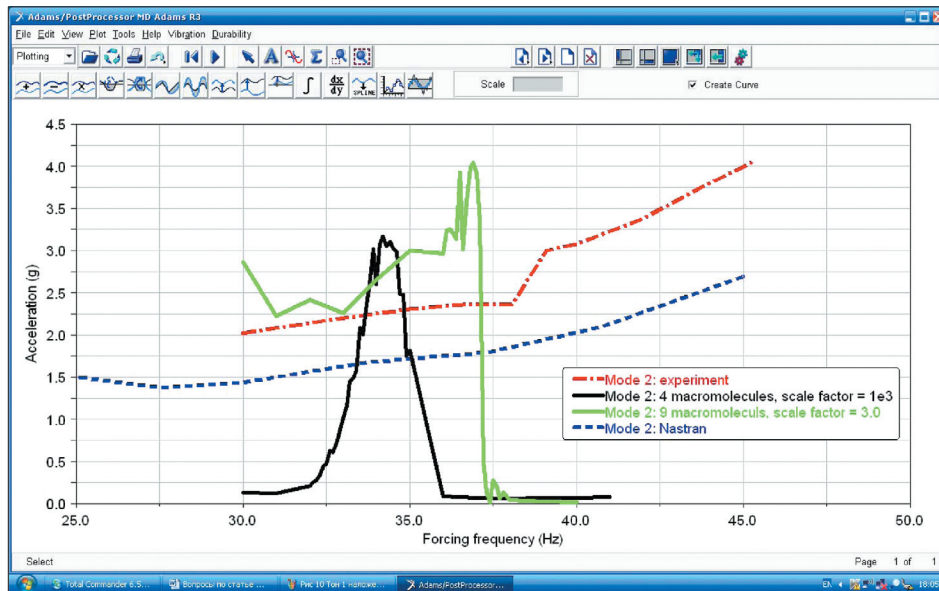


Рис. 8. Форма колебаний макромолекулярной модели на частоте 40 Гц



а



б

Рис. 9. Экспериментальные и расчетные АЧХ пластины в окрестности частоты возбуждения:  
а —  $p = 15,2$  Гц; б —  $p = 39,1$  Гц

показана характерная зависимость интегрируемой функции от ее допустимого приращения на шаге интегрирования (кривая сходимости). Заданное допустимое приращение является условием автоматического выбора шага. Как видно на рис. 7, кривая сходимости имеет «полочку», т. е. рекомендуемое (безразмерное) допустимое приращение в данном конкретном случае равно 0,01.

На рис. 8 приведена макромолекулярная форма колебаний пластины в окрестности резонансной частоты 39,1 Гц, соответствующая рис. 3, б. Видно, что в месте установки датчика

(средняя салатовая линия) макромолекула попадает в узловую зону формы. Крайние угловые макромолекулы колеблются в противофазе. Графика авторской фортрановской программы уступает графике пакета MSC Nastran.

На рис. 9, а и б приведены результаты апробации макромолекулярного подхода для моделей, содержащих 4 (черные кривые) и 9 макромолекул (зеленые кривые). Сравнились расчетные и экспериментальные АЧХ для изгибного и крутильного тонов колебаний пластины с частотой соответственно 15,2 и



39,1 Гц (эксперимент). Как видно из рис. 9, в данной постановке модель, содержащая только 9 макромолекул, дает результат, не уступающий по точности МКЭ (синяя кривая).

## Выводы

1. Выполнена апробация предложенного макромолекулярного подхода путем сравнения

результатов расчета и частотных испытаний пластины. Показано хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

2. Выявлена высокая скорость сходимости результатов расчета по числу макромолекул модели. Для решения задач рассмотренного типа достаточно использовать несколько десятков макромолекул.

## Литература

- [1] Tunuguntla D.R., Thornton A.R., Weinhart T. From discrete elements to continuum fields: Extension to bidisperse systems. *Computational Particle Mechanics*, 2016, is. 3, pp. 349–365, doi 10.1007/s40571-015-0087-y.
- [2] Valera R.S., Morales I.P., Vanmaercke S., Morfa C.R., Cortes L.A., Casanas H.D.-G. Modified algorithm for generating high volume-fraction sphere packing. *Computational Particle Mechanics*, 2015, is. 2, pp. 161–172, doi 10.1007/s40571-015-0045-8.
- [3] Huang X., O’Sullivan C., Hanley K.J., Kwok C.-Y. Partition of the contact force network obtained in discrete element simulations of element tests. *Computational Particle Mechanics*, 2017, is. 4, pp. 145–152, doi 10.1007/s40571-015-0095-y.
- [4] Roy S., Singh A., Luding S., Weinhart T. Micro-macro transition and simplified contact models for wet granular materials. *Computational Particle Mechanics*, 2016, is. 3, pp. 449–462, doi 10.1007/s40571-015-0061-8.
- [5] Radl S., Forgberg T., Aigner A., Kloss C. Parcsale – an open-source library for the simulation of intra-particle heat and mass transport processes in coupled simulations. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain 28–30 September 2015, Polytechnic University of Catalonia, pp. 117–127. Available at: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf) (дата обращения 30 марта 2017).
- [6] Rubio-Largo S.M., Lind P.G., Maza D., Hidalgo R.C. Granular gas of ellipsoids: analytical collision detection implemented on GPUs. *Computational Particle Mechanics*, 2015, is. 2, pp. 127–138, doi 10.1007/s40571-015-0042-y.
- [7] Nassauer B., Liedke T., Kuna M. Development of coupled discrete element (DEM) — smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation method for polyhedral particles. *Computational Particle Mechanics*, 2016, vol. 3, is. 1, pp. 95–106, doi 10.1007/s40571-015-0097-9.
- [8] Campello E.M.-B. A description of rotations for DEM models of particle systems. *Computational Particle Mechanics*, 2015, is. 2, pp. 109–125, doi 10.1007/s40571-015-0041-z.
- [9] Kammara K.K., Kumar R., Donbosco F.S. Reconsideration of metal surface sputtering due to bombardment of high-energy argon ion particles: a molecular dynamics study. *Computational Particle Mechanics*, 2016, is. 3, pp. 3–13, doi 10.1007/s40571-015-0070-7.
- [10] 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.
- [11] Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu. Molecular dynamics modeling of boundary migration in bicrystals under Nano-burnishing. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain 28–30 September 2015, Polytechnic University of Catalonia, pp. 248–254. Available at: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf) (дата обращения 30 марта 2017).
- [12] Arinchev S.V. Simulation of reversed torsion of the AlMg6 aluminium bar using the macro-molecule approach. *International Center for Numerical Methods in Engineering, Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications*. Barcelona, Spain 1–3 September, 2015, Polytechnic University of Catalonia, pp. 429–

439. URL: <http://congress.cimne.com/complas2015/frontal/doc/EbookComplas2015.pdf> (дата обращения 30 марта 2017).
- [13] Arinchev S.V. Back from the solid temperature to kinetic energy of its macro-molecules. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the IV-th International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications*. Barcelona, Spain 28–30 September, 2015, Polytechnic University of Catalonia, pp. 909–920. Available at: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf) (дата обращения 30 марта 2017).
- [14] Аринчев С.В. Моделирование механики нагрева твердого тела с помощью макромолекул. *Решетневские чтения. Матер. XX Междунар. науч.-практ. конф.*, 09–12 ноября 2016, Красноярск, Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева, 2016, ч. 1, с. 216–217.
- [15] Rodrigues J.M., Jonsen P., Svoboda A. Simulation of metal cutting using the particle finite-element method and a physically based plasticity model. *Computational Particle Mechanics*, 2017, is. 4, pp. 35–51, doi 10.1007/s40571-016-0120-9.

## References

- [1] Tunuguntla D.R., Thornton A.R., Weinhart T. From discrete elements to continuum fields: Extension to bidisperse systems. *Computational Particle Mechanics*, 2016, is. 3, pp. 349–365, doi 10.1007/s40571-015-0087-y.
- [2] Valera R.S., Morales I.P., Vanmaercke S., Morfa C.R., Cortes L.A., Casanas H.D.-G. Modified algorithm for generating high volume-fraction sphere packing. *Computational Particle Mechanics*, 2015, is. 2, pp. 161–172, doi 10.1007/s40571-015-0045-8.
- [3] Huang X., O’Sullivan C., Hanley K.J., Kwok C.-Y. Partition of the contact force network obtained in discrete element simulations of element tests. *Computational Particle Mechanics*, 2017, is. 4, pp. 145–152, doi 10.1007/s40571-015-0095-y.
- [4] Roy S., Singh A., Luding S., Weinhart T. Micro-macro transition and simplified contact models for wet granular materials. *Computational Particle Mechanics*, 2016, is. 3, pp. 449–462, doi 10.1007/s40571-015-0061-8.
- [5] Radl S., Forberg T., Aigner A., Kloss C. Parcsale – an open-source library for the simulation of intra-particle heat and mass transport processes in coupled simulations. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain 28–30 September 2015, Polytechnic University of Catalonia, pp. 117–127. Available at: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf) (accessed 30 March 2017).
- [6] Rubio-Largo S.M., Lind P.G., Maza D., Hidalgo R.C. Granular gas of ellipsoids: analytical collision detection implemented on GPUs. *Computational Particle Mechanics*, 2015, is. 2, pp. 127–138, doi 10.1007/s40571-015-0042-y.
- [7] Nassauer B., Liedke T., Kuna M. Development of coupled discrete element (DEM) – smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation method for polyhedral particles. *Computational Particle Mechanics*, 2016, vol. 3, is. 1, pp. 95–106, doi 10.1007/s40571-015-0097-9.
- [8] Campello E.M.-B. A description of rotations for DEM models of particle systems. *Computational Particle Mechanics*, 2015, is. 2, pp. 109–125, doi 10.1007/s40571-015-0041-z.
- [9] Kammara K.K., Kumar R., Donbosco F.S. Reconsideration of metal surface sputtering due to bombardment of high-energy argon ion particles: a molecular dynamics study. *Computational Particle Mechanics*, 2016, is. 3, pp. 3–13, doi 10.1007/s40571-015-0070-7.
- [10] Krivtsov A.M., Krivtsova N.V. Metod chastits i ego ispol'zovanie v mekhanike deformiruemogo 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.
- [11] Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu. Molecular dynamics modeling of boundary migration in bicrystals under Nano-burnishing. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain 28–30 September 2015, Polytechnic Uni-

- versity of Catalonia, pp. 248–254. Available at: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf) (accessed 30 March 2017).
- [12] Arinchev S.V. Simulation of reversed torsion of the AlMg6 aluminum bar using the macro-molecule approach. *International Center for Numerical Methods in Engineering, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain 1–3 September 2015, Polytechnic University of Catalonia, pp. 429–439. Available at: <http://congress.cimne.com/complas2015/frontal/doc/EbookComplas2015.pdf> (accessed 30 March 2017).
- [13] Arinchev S.V. Back from the solid temperature to kinetic energy of its macro-molecules. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the IV-th International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain 28–30 September 2015, Polytechnic University of Catalonia, pp. 909–920. Available at: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf) (accessed 30 March 2017).
- [14] Arinchev S.V. Modelirovanie mekhaniki nagreva tverdogo tela s pomoshch'iu makromolekul [Modeling of the mechanics of heat to the solid body by means of the macromolecules]. *Reshetnevskie chteniia. Materialy 20 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Reshetnevskie reading. 20 materials of the International scientific-practical conference]. Krasnoyarsk, 9–12 November 2016, Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet im. akademika M.F. Reshetneva publ., 2016, pt. 1, pp. 216–217.
- [15] Rodrigues J.M., Jonsen P., Svoboda A. Simulation of metal cutting using the particle finite-element method and a physically based plasticity model. *Computational Particle Mechanics*, 2017, is. 4, pp. 35–51, doi 10.1007/s40571-016-0120-9.

Статья поступила в редакцию 10.04.2017

## 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 Vasilyevich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет 2-е издание учебника  
**Э.А. Гладкова, В.Н. Бродягина, Р.А. Перковского**

### «Автоматизация сварочных процессов»

Приведено описание основных элементов автоматизации сварочных установок. Даны принципы построения и примеры реализации современных систем управления оборудованием и процессами дуговой, контактной и электронно-лучевой сварки. Рассмотрены системы управления пространственным положением источника нагрева относительно линии стыка, автоматизированные комплексы с микроконтроллерами и ЭВМ для управления качеством сварного соединения, а также проблемы роботизации дуговой и контактной сварки.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru