

УДК 621.787.6; 004.942

## ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРОУДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КРЫЛЬЧАТКИ

Копылов С.Ю.

ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»,  
Воронеж, e-mail: rector@vorstu.ru

Методом дискретных элементов на основе применения многоядерных параллельных вычислительных устройств и 3D-видеокарт на базе программно-аппаратной платформы NVidia CUDA исследована динамика трехмерного движения элементов технологической системы контейнер-деталь-инструментальная среда в процессе виброударного упрочнения центробежной крыльчатки. Трехмерная модель упрочняемой крыльчатки представлена набором элементарных треугольных площадок – сплайнов. Показано, что при применении массивно-параллельных программно-аппаратных платформ для моделирования гранулированных сред, состоящих из десятков и сотен тысяч элементов, по сравнению с традиционными вычислительными системами на базе процессоров общего назначения время моделирования может быть сокращено в 10 и более раз. В частности, алгоритм начального заполнения контейнера выполняется более чем в 1000 раз быстрее. Исследовано влияние количества гранул инструментальной среды на время моделирования. Приведены результаты численных экспериментов по исследованию шероховатости.

**Ключевые слова:** центробежная крыльчатка, виброударное упрочнение, параллельная вычислительная система, технология NVidia CUDA, метод дискретных элементов

## THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELLING OF PROCESS OF VIBROSHOCK HARDENING OF CENTRIFUGAL KRYLCHATKA

Kopylov S.Y.

Voronezh State technical university, Voronezh, e-mail: rector@vorstu.ru

The method of discrete elements on the basis of use of multinuclear parallel computers and 3D – videocards on the basis of the hardware-software NVidia CUDA platform investigated dynamics of three-dimensional movement of elements of technological system the container-detail-tool environment in the course of vibroshock hardening of a centrifugal krylchatka. Three measured model of a strengthened krylchatka is presented by a set of elementary triangular platforms – splines. It is shown that at application of massive and parallel hardware-software platforms for modeling of the granulated environments consisting of tens and hundred thousand elements in comparison with traditional computing systems on the basis of processors of general purpose, time of modeling can be reduced in 10 and more times. In particular, the algorithm of initial filling of the container is executed more than in 1000 of times quicker. Influence of quantity of granules of the tool environment for the period of modeling is investigated. Results of numerical experiments on roughness research are given.

**Keywords:** centrifugal krylchatka, vibroshock hardening, parallel computing system, NVidia CUDA technology, discrete element method

Центробежные крыльчатки (рабочие колеса) относятся к деталям роторной группы. Являясь одним из основных рабочих органов турбонасосных агрегатов и компрессоров, они предназначены для передачи механической энергии потоку газа, протекающему через них. Передача энергии от центробежной крыльчатки к газу происходит благодаря динамическому взаимодействию ее лопастей с протекающей жидкостью (газом). К этим деталям, работающим в условиях больших оборотов (до 30000 об/мин), интенсивного силового, температурного и химического воздействия, предъявляются высокие требования к качеству поверхностного слоя: шероховатости, остаточным напряжениям. Одним из методов достижения заданных технологических параметров поверхностного слоя является применение виброабразивной обработки и виброударного упрочнения [2]. При виброударной обработке интенсивно вибрирующая инструментальная среда, представляющая собой ансамбль частиц,

в течение 30–45 минут соударяется с деталью. При соударениях образуется множество локальных отпечатков на поверхности детали, которые формируют упрочненный слой. В отличие от работы [4], где было проведено численное исследование виброабразивной обработки в двухмерной постановке, в настоящей статье приводятся результаты трехмерного математического моделирования процесса виброударного упрочнения крыльчатки.

Центробежная крыльчатка компрессора полуоткрытого типа (рис. 1) предназначена для нагнетания воздуха в цилиндры двигателя внутреннего сгорания. Она содержит 14 лопаток и 14 проточных каналов. Изготавливается крыльчатка объемной горячей многопозиционной штамповкой из алюминиевого сплава АЛ6 с калибровкой. Исходная шероховатость поверхностей лопаток и проточных каналов составляет 23–28 мкм, требуемая конечная шероховатость  $Rz \leq 10\text{--}15$  мкм. Диаметр крыльчатки равен 160 мм, а высота ее – 35 мм.

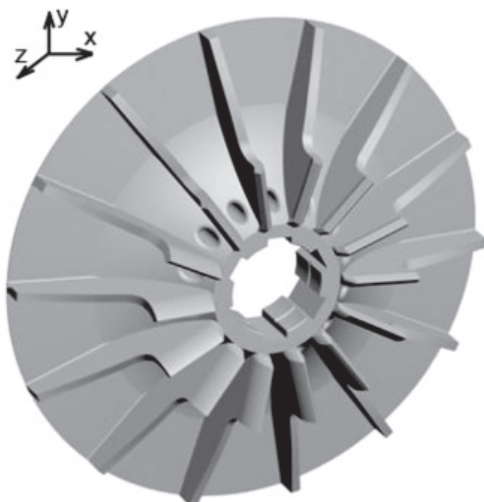


Рис. 1. Исследуемая центробежная крыльчатка компрессора полуоткрытого типа

Для моделирования применяется гетерогенная вычислительная система на базе программно-аппаратной платформы CUDA фирмы NVidia. Основные вычисления производились на специальном сопроцессоре – 3D-видеокарте, а центральный процессор выполнял утилитарные функции (копирование данных в (из) память видеокарты, сохранение информации в базу данных и др.). Данный сопроцессор имеет SIMD-архитектуру, т.е. один поток команд исполняется применительно к множественному потоку данных [1]. Это обеспечивает параллельность вычислений, что в итоге ведет к повышению производительности отдельных алгоритмов, в числе которых алгоритм метода дискретных элементов. Он используется в настоящей работе для моделирования динамики конечного множества частиц инструментальной среды.

В настоящей работе используется модель деформируемых частиц. Такие частицы в точке контакта внедряются друг в друга на малую величину, соизмеримую с высотой их микронеровностей, с определенной силой взаимодействия, которая зависит от величины внедрения. Частицы при контакте взаимодействуют посредством вязкоупругой силы – линейной комбинации закона Гука и вязкой составляющей, характеризующей диссипацию энергии при соударении. Величина нормальной составляющей контактной силы

$$\vec{F}_n = cx + b\vec{V}_n, \quad (1)$$

где  $c$  – коэффициент квазижесткости;  $b$  – коэффициент демпфирования.

Коэффициент квазиупругой жесткости характеризует силу отталкивания, а коэффициент демпфирования – потери энергии

при соударении. Эти коэффициенты могут быть получены из эксперимента или аналитически, из теории Герца. Уравнение тангенциальной составляющей силы, учитывающей трение Кулона, имеет вид

$$\vec{F}_t = \mu \vec{s} |F_n|, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкого трения,  $\vec{s}$  – единичный вектор, направленный в сторону, противоположную вектору тангенциальной составляющей относительной скорости соударения.

Общая сила взаимодействия будет равна векторной сумме тангенциальной и нормальной составляющих. Модель адекватно описывает поведение трехмерной среды и достаточно проста в реализации.

Трехмерное моделирование динамики процесса виброударного упрочнения было проведено для инструментальной среды, состоящей из 22000 стальных шариков диаметром  $d = 5$  мм, массой  $m = 0,000511$  кг. Трехмерная модель контейнера и детали представлена конечным множеством элементарных треугольных площадок – сплайнов. Количество сплайнов в моделях контейнера и центробежной крыльчатки компрессора соответственно равно 480 и 49929. На детали большее количество сплайнов выбрано для более точной детализации параметров соударений. Трехмерная модель была разработана в системе трехмерного моделирования 3D Studio Max 2010. При этом сплайновая сетка на детали была дополнительно «нормализована», т.е. ей была придана однородность размеров сплайнов при помощи модификатора «Subdivide» программы 3D Studio Max (см. рис. 2). Детализация модели детали была повышена с 35768 до 49929 сплайнов, а средняя площадь сплайна составила  $12,5 \text{ мм}^2$ . Повышение детализации модели приводит к увеличению точности расчета распределения любого динамического или технологического параметра по трехмерной поверхности.

Контактная модель, используемая для расчета соударений между гранулами, используется и при расчете соударения гранулы о сплайн поверхности детали и контейнера. Отличие состоит в том, что сплайн детали или контейнера в данном случае подменяется фиктивной гранулой значительно большего размера и массы, у которой центр расположен таким образом, что сплайн лежит на ее поверхности [3].

Первой стадией моделирования является задание начальных координат положения всех гранул в свободном трехмерном пространстве контейнера и задание начальных скоростей перемещений. Задание началь-

ной скорости – задача тривиальная, расчет начальных положений гранул в пространстве – задача более затратная с точки зрения объема вычислений. Алгоритм заполнения основан на методе трассировки лучей, когда из тестируемой точки пространства «испускается» луч и подсчитывается количество пересечений со сплайнами модели. Если количество пересечений нечетное, значит,

точка находится внутри объема, ограниченного трехмерной моделью. Видно, что для размещения всех частиц в пространстве необходимо выполнить  $n \times k$  тестов «луч-сплайн» на предмет пересечений, где  $n$  – количество частиц, а  $k$  – количество сплайнов. Тест одной точки можно делать независимо от теста другой, при этом алгоритм хорошо распараллеливается.

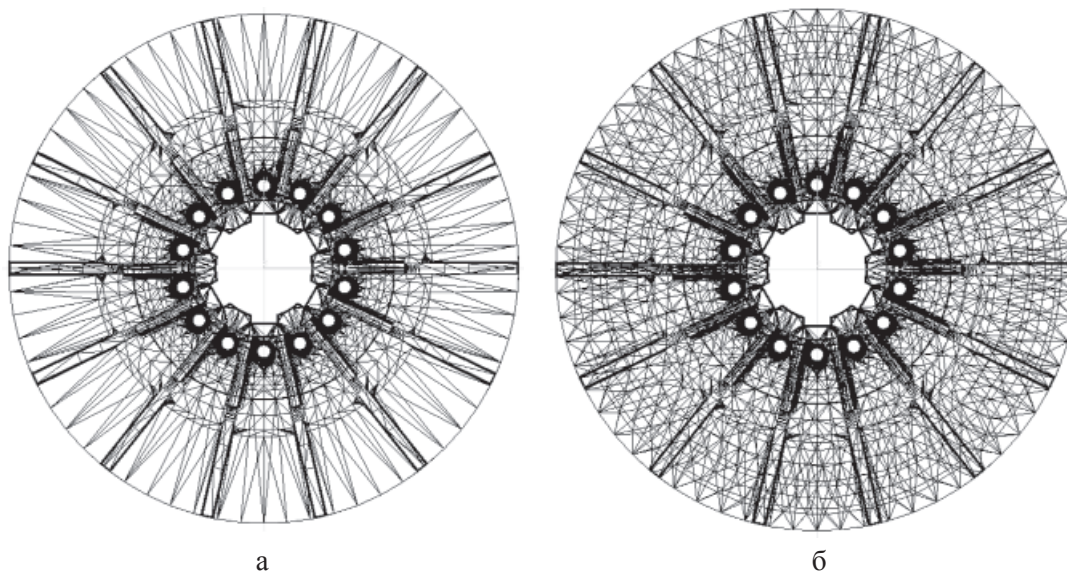


Рис. 2. Генерация сетки треугольных сплайнов (проекция модели на плоскость  $XOY$ ):  
а – начальная неоптимизированная структура сплайнов; б – структура сплайнов, обработанная модификатором «subdivide»

В «классическом» алгоритме, когда программный код выполняется на центральном процессоре, имеется функция `Reset()`, которая в цикле последовательно вызывается для каждой тестируемой точки. Для реализации параллельной обработки точек трехмерного пространства указанная функция была переопределена со спецификатором `__global__ void Reset_D(...)`.

Этот спецификатор указывает, что запускается функция хостом (host), т.е. центральным процессором, а исполняется на устройстве (device), т.е. графическом процессоре [5]. Перед самым вызовом функции ядра указывается конфигурация вычислительной сетки (grid), так как весь массив запускаемых параллельных потоков имеет свою структуру и подразделяется на блоки [1]. Указывается количество блоков в сетке и количество потоков в блоке. Задается конфигурация специальными символами `<<<>>>`, между которыми и определяется конкретная конфигурация сетки [1]:

```
Reset_D <<< numBlocks,  
        numThreads >>> (...)
```

Количество нитей на блок и количество блоков по каждому измерению сетки имеет ограничение. Чтобы узнать максимальные значения количества нитей в блоке и количество блоков, необходимо обратиться к драйверу устройства посредством вызова функции `cuda Get Device Properties` [5].

Программно-аппаратная конфигурация компьютера: ЦП Intel Core i7 950 3.06 GHz HT, ОЗУ 3×4 GB DDR3 1333 MHz Kingston, накопитель SSD: OCZ Vertex 3 60 GB SATA3, ОС Microsoft Windows 7 Pro x64, MS SQL Server 2008 Standard Edition, видеокарта Asus GeForce GTX580 DirectCU2 в качестве вычислительного сопроцессора.

Время моделирования за счет применения указанной ранее программно-аппаратной конфигурации компьютера и параллельных вычислений сокращается до 1500 раз по сравнению с вычислениями на центральном процессоре.

Быстродействие вычислений при выполнении алгоритма начального заполнения контейнера на графическом процессоре (ГП) 3D-видеокарты в сотни и более раз больше, чем на центральном процессоре (ЦП) (рис. 3).

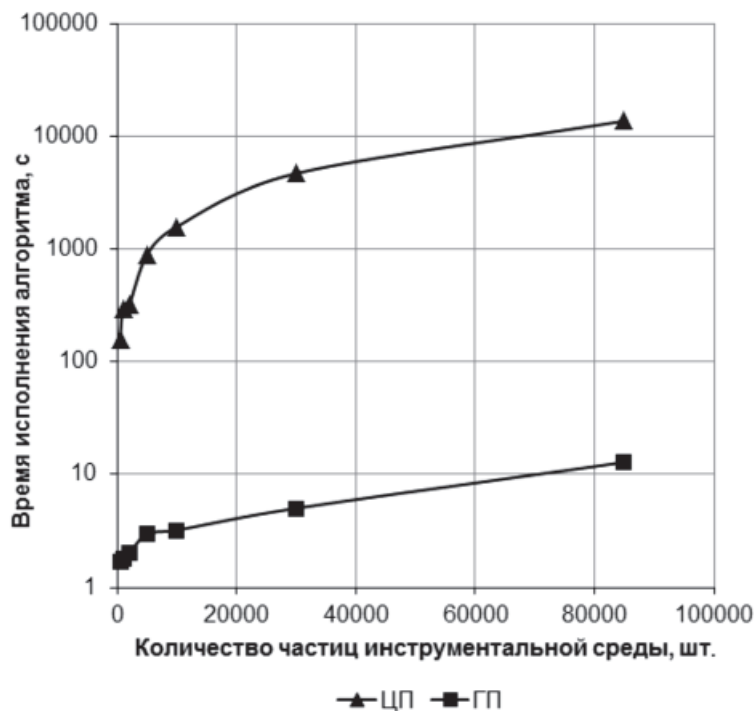


Рис. 3. Производительность алгоритма «заполнения» контейнера при выполнении трехмерного моделирования на центральном процессоре (ЦП) и графической плате (ГП)

Производительность моделирования трехмерной задачи примерно равна времени двухмерного моделирования (рис. 4). В результате трехмерного моделирования по разработанной программе получена информация о трехмерном координатном распределении скоростных и энергетических параметров, технологических па-

раметров формирования поверхностного слоя для конечного множества сплайнов детали сложной формы, с учетом ее размеров, формы и расположения поверхности, физико-механических свойств ее материала, размерных и физико-механических параметров инструментальной среды.

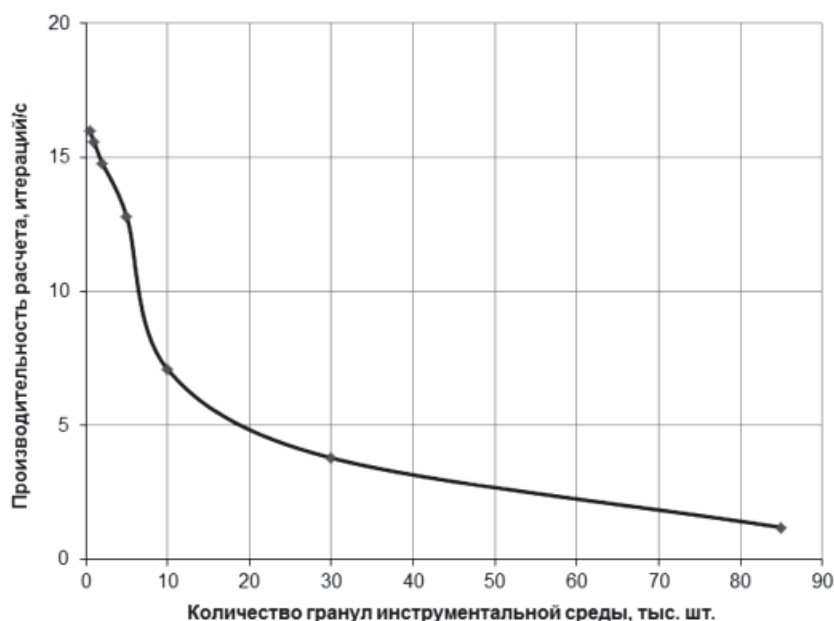


Рис. 4. Зависимость производительности трехмерного моделирования от количества частиц вибрирующей инструментальной среды

**Список литературы**

1. Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК Пресс. 2010. – 232 с.
2. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга». 2011. – 568 с.
3. Копылов Ю.Р., Копылов С.Ю. Трехмерное моделирование виброударного упрочнения с использованием программной платформы CUDA. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: сб. докладов XI междунар. конф. – Орел.: Госуниверситет-УНПК, 2012. – С. 222–224.
4. Копылов Ю.Р., Попов А.А., Моделирование виброабразивной обработки межлопаточной зоны центробежной крыльчатки. Сб. научных трудов по материалам 7-й научно-технической конф. «Вибрационные машины и технологии». – Курск: Издание КГТУ, 2005. – С. 200–203.
5. Сандерс Дж., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах // Введение в программирование графических процессоров. – 2011. – 476 с.

**References**

1. Boreskov A.V., Harlamov A.A. Osnovy raboty s tehnologiej CUDA, 2010, pp. 232.

2. Kopylov J.R. Dinamika processov vibroudarnogo uprochnenija: monografija – Voronezh: IPC «Nauchnaja kniga», 2011, pp. 568.

3. Kopylov J.R., Kopylov S.J. Trehmernoe modelirovanie vibroudarnogo uprochnenija s ispol'zovaniem programmnoj platformy CUDA. Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2012, pp. 222–224.

4. Kopylov J.R., Popov A.A. Modelirovanie vibroabrazivnoj obrabotki mezhlopatочноj zony centrobezhnoj kryl'chatki. Vibracionnye mashiny i tehnologii. 2005, pp. 200–203.

5. Jason Sanders, Edward Kandrot CUDA by example: An introduction to General-Purpose GPU Programming, 2011, pp. 476.

**Рецензенты:**

Копылов Ю.Р., д.т.н., профессор Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж;

Колодежнов В.Н., д.т.н., профессор Воронежского государственного университета инженерных технологий, г. Воронеж.

Работа поступила в редакцию 01.07.2013.