

УДК 621.9.04

## Прогнозирование точности при обработке резанием

**А.Г. Кондрашов, Д.Т. Сафаров**

Набережночелнинский институт ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 423812, Набережные Челны, Российская Федерация, пр. Мира., д. 68/19.

## Prediction of accuracy in cutting

**A.G. Kondrashov, D.T. Safarov**

Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University, Mira str., 68/19, 423812, Naberezhnye Chelny, Russian Federation.



e-mail: kondrashovag@mail.ru, DTSafarov@kpfu.ru



В настоящее время актуальной задачей является сокращение сроков подготовки производства и обеспечение стабильности выпуска качественной продукции. Приведен обзор методик математического моделирования геометрической точности при обработке резанием. Выявлены недостатки существующих методик. Предложена методика, включающая структурирование модулей технологической системы с конечными элементами в виде опорных точек на базовых поверхностях. С каждым модулем связана своя система координат, в которой заданы опорные точки. На сопрягаемых поверхностях модулей по этим точкам построены триангуляционные сетки. Разработан математический аппарат, позволяющий имитировать контакт вершин и граней сеток базовых элементов сопрягаемых модулей и определять положения систем координат модулей относительно друг друга. В качестве примера рассмотрена имитация процесса формообразования и выполнена оценка отклонений показателей геометрической точности обработанных элементов изделия.

**Ключевые слова:** обработка резанием, геометрическая точность, модули технологической системы, системы координат, опорные точки.



To reduce the preproduction time and ensure continuous production of quality products is very important nowadays. An overview of the methods of mathematical modeling of the geometric accuracy in cutting is presented. Shortcomings of existing techniques are analyzed. A technique based on representing the technological system modules by finite elements interconnected at reference points on the base surface is proposed. Each module has its own coordinate system and associated reference points. These points are used to construct triangular meshes on the adjacent surfaces of the modules. A mathematical tool is developed to simulate the contact of vertices and faces belonging to the meshes of the basic elements of adjacent modules and determine the relative position of the coordinate systems of the modules. An example formation process is simulated and the geometric accuracy of machine-cut elements is estimated.

**Keywords:** cutting, geometric accuracy, process modules, coordinate system, reference point.

Качество обработанных поверхностей формируется в несколько этапов. При этом существенный вклад вносит точность изготовления и износ базовых элементов модулей инструментальной оснастки. Отклонение каждого из

показателей точности (относительное положение, геометрические размеры, отклонения профиля, формы, волнистость) представляет собой сумму технологических составляющих, каждая из которых вызвана отклонением от заданного

положения конкретного модуля системы [1]. Решение задачи мониторинга состояния металлорежущего оборудования и оснастки по измеренным показателям точности представлено в работе [2]. Методика, описанная в этой работе, основана на координатном измерении показателя точности до и после обработки в одних и тех же точках, регистрации параметров процесса и вычисления отклонений модулей технологической системы.

Повысить эффективность методик, приведенных в работах [1, 2], возможно за счет прогнозирования точности обработки. Однако существующие методики проектирования инструмента и оснастки основаны на идеализированных моделях процесса, в которых модули заменены идеальными поверхностями — плоскостями, цилиндрическими поверхностями и др. В результате невозможно моделировать фактические отклонения обрабатываемых элементов для конкретных условий и обеспечить их прогнозирование во времени.

Прогнозированием точности механической обработки занимались многие российские ученые. В работе [3] процесс формообразования представлен как движение взаимосвязанных систем координат, проведенных через звенья технологической системы, которые непосредственно участвуют в образовании погрешности обработки детали. При этом учитывается силовое взаимодействие между звеньями, однако сами звенья представлены как комплексы идеальных поверхностей и не принимаются во внимание их реальные форма и профиль, полученные при изготовлении и в результате износа.

В работах [4–6] станочные модули представлены в виде объемных и поверхностных конечных элементов. Станочная система рассматривается как совокупность систем координат отдельных модулей, начало координат которых совпадает с их центром тяжести. Связь между системами координат осуществляется посредством трех параметров смещения начала координат и трех углов поворота, которые рассчитываются из условия контакта поверхностных конечных элементов. Ансамбль поверхностных

конечных элементов определяется путем математического моделирования, исходя из проектных требований к поверхности. Вопрос измерения при нахождении вершин элементов не рассматривается. Процесс базирования модулей не раскрывается (у модулей не выделены установочные, направляющие, упорные элементы). Как следствие, невозможно имитировать процесс обработки, можно лишь оценить точность положения отдельных модулей технологической системы. Отсутствует пример реализации методики с конкретными значениями.

Расчет точности металлорежущего оборудования с помощью матричных методов для суммирования погрешностей рассмотрен в работах [7, 8]. Общим недостатком указанных работ является отсутствие возможности прогнозирования точности обработки изделия, поскольку точность отдельных движений станков рассматривается без комплексного моделирования результата формообразования и оценки качества изделия.

Цель работы — разработка математического аппарата моделирования элементов, образованных в операциях лезвийного формообразования, на основе построения замкнутых цепей технологических модулей в единой системе координат.

Для учета отклонений модулей технологической системы проанализируем структуру модуля и механизм их базирования.

Исследование проведем по определенной методике. Каждый модуль технологической системы рассмотрим как набор комплексов элементов. В общем случае можно выделить присоединительный, посадочный, управляющий и рабочий комплексы. Присоединительный и посадочный комплексы состоят из установочного, направляющего и упорного элемента, которые, в свою очередь, состоят из опорных точек (рис. 1).

Контактируя в опорных точках присоединительных и посадочных комплексов модули образуют замкнутую цепь. Применительно к процессу формообразования эту цепь можно разделить на две ветви — инструментальную и

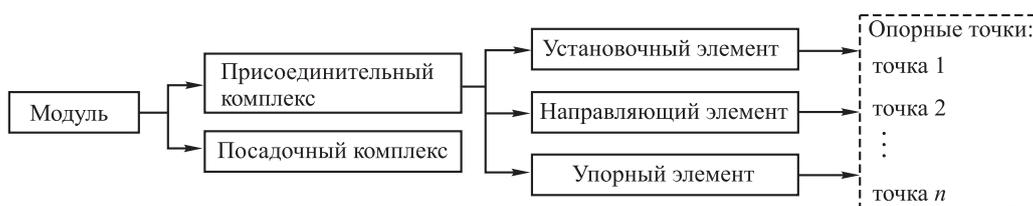


Рис. 1. Структура модуля технологической системы

заготовительную. Начало цепи находится в полюсе резания, а конец — на станине.

Модули инструментальной ветви:

- пластина;
- корпус зубозакругляющей фрезы;
- оправка;
- шпиндель инструмента;
- суппортная группа;
- станина.

Модули заготовительной ветви:

- заготовка;
- патрон;
- шпиндель изделия;
- станина.

Присоединительные и посадочные комплексы модулей можно представить в виде сетки, элементарной ячейкой которой является участок плоскости, ограниченный треугольником. Исходными данными для построения элементарных ячеек являются результаты измерения координат точек на указанных комплексах для

каждого модуля в своей системе координат.

Для построения модели приняты следующие допущения:

- сетка элементарных ячеек является абсолютно жесткой;
- сопряжение сеток осуществляется в виде контакта точек-вершин с гранями элементарных ячеек.

При этом контактирующие вершины и грани могут располагаться на обоих модулях. На установочном элементе существует три точки контакта, на направляющем — две, а на упорном — одна.

Моделирование процесса базирования сводится к построению систем координат всех модулей, входящих в цепь, в единой системе координат станка. Определить положения систем координат отдельных модулей возможно, последовательно встраивая один модуль в другой (рис. 2) с пересчетом координат точек в общую систему координат.

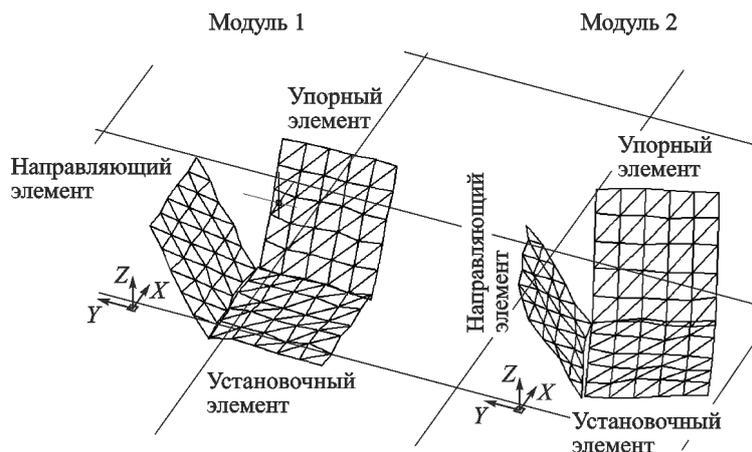


Рис. 2. Начальное положение модулей

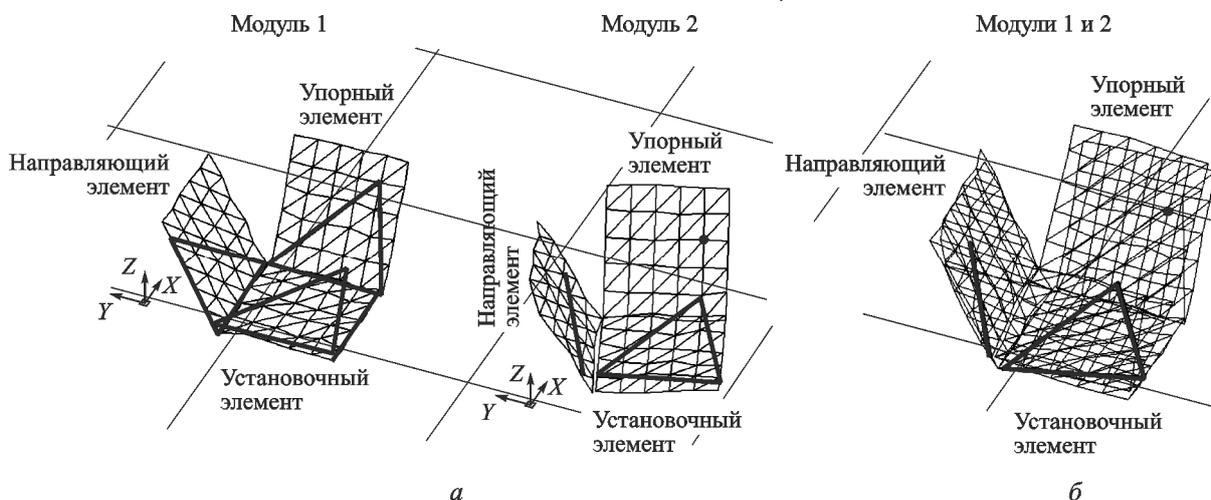


Рис. 3. Предварительное базирование модулей:  
а — до базирования; б — после базирования

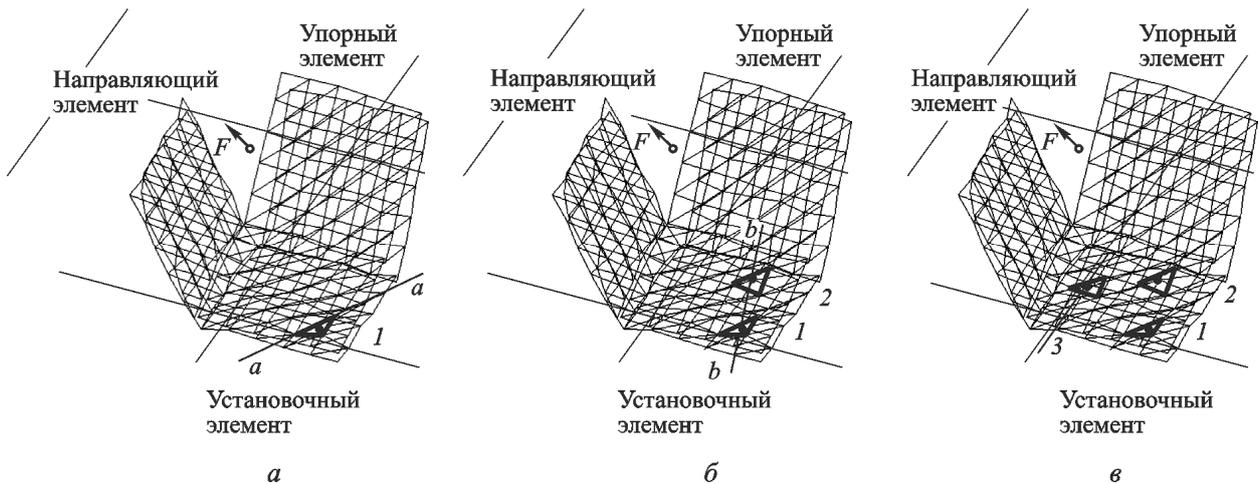


Рис. 4. Нахождение трех точек контакта 1–3

Определение точек контакта вершин и грани сеток двух модулей — сложная задача, решение которой выполним в несколько этапов:

*этап 1* — предварительное базирование по прилегающим поверхностям, построенным на произвольно взятых вершинах (рис. 3). Это могут быть плоскости, цилиндрические и конические поверхности;

*этап 2* — обеспечение контакта по одной точке и зазора по всем остальным точкам (рис. 4, а). Для этого определяют расстояния по нормали между противоположными вершинами и ячейками. Подвижный модуль смещают на величину минимального расстояния по нормали;

*этап 3* — построение вектора действия силы  $F$  прижима модуля. Перпендикулярно вектору силы через точку первичного контакта 1 строится мгновенная ось вращения  $a-a$  (рис. 4, б). Поворот модуля вокруг этой оси  $a-a$  до появления контакта в точке 2;

*этап 4* — построение мгновенной оси вращения  $b-b$  через две точки контакта. Поворот модуля вокруг этой оси до появления контакта в третьей точке (рис. 4, в);

*этап 5* — определение реакций в точках контакта. Решение задачи статики и нахождение вектора нескомпенсированной силы  $F'$  прижима;

*этап 6* — проецирование полученного вектора на контактные грани, определение усредненного направления. Нахождение потенциальной точки контакта в данном направлении. Перемещение модуля до появления контакта в потенциальной точке с сохранением контакта ранее найденных вершин и граней (рис. 5). Для этого найденные точки контакта представляют в виде матрицы  $|M_k|$  до перемещения и  $|M_k^*|$  —

после перемещения; контактные грани представляются матрицей  $|P|$  коэффициентов уравнений плоскостей и вектором  $|D|$ :

$$|M_k| = \begin{vmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & \dots & Y_n \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}; \quad |M_k^*| = \begin{vmatrix} X_1^* & X_2^* & \dots & X_n^* \\ Y_1^* & Y_2^* & \dots & Y_n^* \\ Z_1^* & Z_2^* & \dots & Z_n^* \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix};$$

$$|P| = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ A_n & B_n & C_n \end{vmatrix}; \quad |D| = \begin{vmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_n \end{vmatrix}.$$

Система уравнений, описывающая перемещение модуля с сохранением контакта вершин и граней, имеет вид

$$\begin{cases} |M_k^*| = |M_k| |H|; \\ |M_k^*| |P| = |D|, \end{cases} \quad (1)$$

где  $|H|$  — матрица преобразования;

*этап 7* — проверка взаимного проникновения модулей, нахождение точек проникновения (рис. 6, а). Замена точек контакта на точки

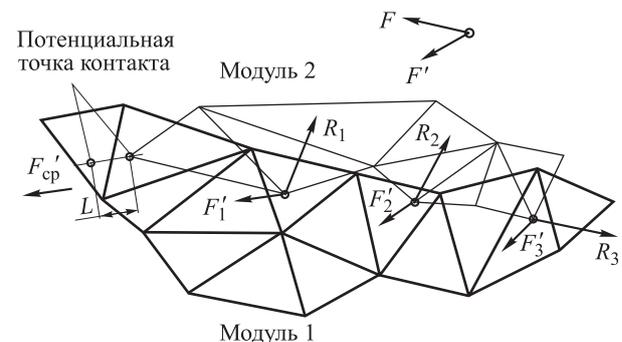


Рис. 5. Определение потенциальной точки контакта

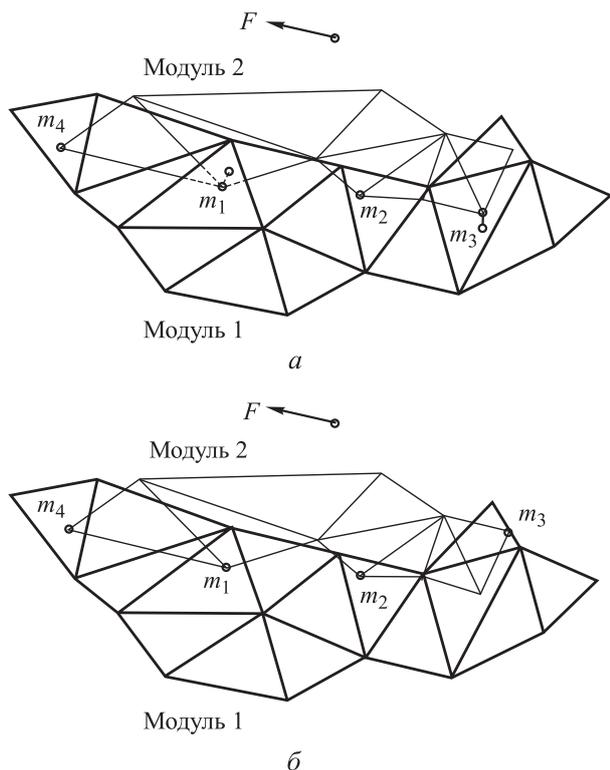


Рис. 6. Определение точек взаимного проникновения (а) и нахождение новых точек контакта (б)

проникновения, решение системы уравнений (1) — обеспечение контакта по новым точкам (рис. 6, б).

Этапы 5 и 7 необходимо итерационно повторить до обеспечения равновесного состояния модулей друг относительно друга (отсутствие нескомпенсированной силы прижима).

Теоретическая апробация методики проведена на примере операции зубозакругления [9] и заключалась в имитации процесса формообразования. Были определены координаты точек режущей кромки в единой системе координат с обрабатываемой заготовкой и построены поверхности вращения режущей кромки обеих фрез относительно оси шпинделя. Полученные поверхности вращения пересекаются между собой и с поверхностями заготовки, образуя на детали рабочий комплекс, обеспечивающий плавность включения передачи (рис. 7).

Предложенная методика учитывает реальное состояние модулей технологической системы и

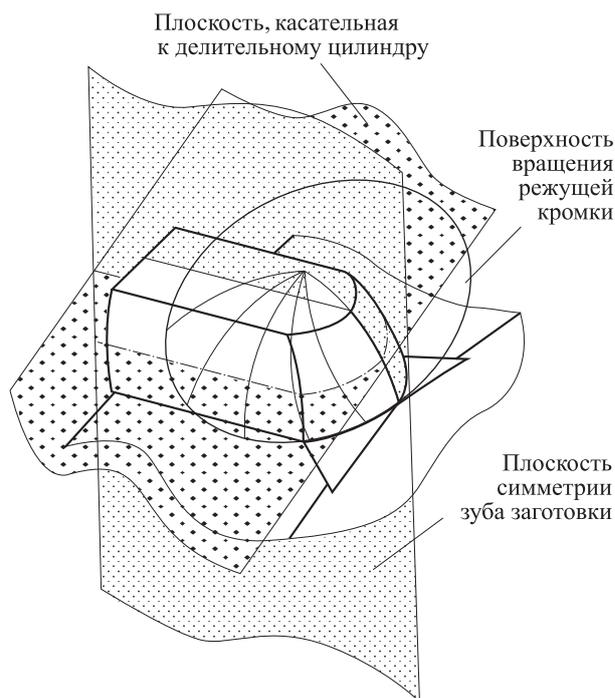


Рис. 7. Схема определения показателей точности зубозакругления имитационной модели

позволяет прогнозировать точность формообразования в процессе выпуска продукции в виде отклонения от середины поля допуска и поддерживать значения показателей в требуемом диапазоне.

## Выводы

1. Проведенное теоретическое исследование показало принципиальную возможность прогнозирования точности лезвийного формообразования, адекватность результатов которого, в первую очередь, определяется точностью измерения базовых поверхностей модулей технологической системы.

2. На основе анализа моделирования процесса базирования модулей технологической системы выявлена необходимость структурирования каждого из них по единой методике с обязательным выделением присоединительных и посадочных комплексов, в каждом из которых определяются установочные, направляющие и упорные базовые элементы, служащие критериями поиска координат точек контакта.

## Литература

[1] Касьянов С.В., Сафаров Д.Т. Формирование отклонений показателей качества при создании продукции. *Методы менеджмента качества*, 2007, № 2, с. 30–36.

- [2] Касьянов С.В., Сафаров Д.Т., Кондрашов А.Г., Кузнецова А.В. Диагностические измерения геометрических параметров пространственно-сложных деталей автокомпонентов однокоординатным высотомером. *Контроль. Диагностика*, 2013, № 8, с. 60–64.
- [3] Митрофанов В.Г., Драчев О.И., Капитанов А.В. *Моделирование и управление производственными системами*. Ирбит, ОНИКС, 2011. 243 с.
- [4] Косов М.Г., Кутин А.А., Саакян Р.В., Червяков Л.М. *Моделирование точности при проектировании технологических машин*. Москва, МГТУ «СТАНКИН», 1997. 104 с.
- [5] Кузнецов А.П., Косов М.Г. Структурная точность металлорежущих станков. *СТИН*, 2012, № 5, с. 2–7.
- [6] Корзаков А.А., Косов М.Г. Моделирование контактной жесткости поверхностей. *Вестник МГТУ СТАНКИН*, 2008, № 2, с. 6–10.
- [7] Спирин В.А., Красильников М.А., Михайлов А.А. Методология комплексного расчета точности обработки для токарных станков с ЧПУ. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*, 2012, т. 14, № 2, с. 77–89.
- [8] Кольцов А.Г. Методика построения математической модели точности технологического оборудования на базе многооперационного станка. *Вестник УГАТУ*, 2013, т. 17, № 8(61), с. 106–116.
- [9] Белугин Ю.Ф., Кондрашов А.Г. *Способ закругления торцев зубьев зубчатых колес (варианты)*. Пат. № 2318636, РФ. 2008, бюл. № 7. 18 с.

## References

- [1] Kas'ianov S.V., Safarov D.T. Formirovanie otklonenii pokazatelei kachestva pri sozdanii produktsii [Formation of the deviations of quality when creating products]. *Metody menedzhmenta kachestva* [Methods of Quality Management]. 2007, no. 2, pp. 30–36.
- [2] Kas'ianov S.V., Safarov D.T., Kondrashov A.G., Kuznetsova A.V. Diagnosticheskie izmereniia geometricheskikh parametrov prostranstvenno-slozhnykh detalei avtokomponentov odnokoordinatnym vysotomerom [Diagnostic measurements of geometrical parameters of the space-one-coordinate complex parts automotive altimeter]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2013, no. 8, pp. 60–64.
- [3] Mitrofanov V.G., Drachev O.I., Kapitanov A.V. *Modelirovanie i upravlenie proizvodstvennyimi sistemami* [Modeling and management of production systems]. Irbit, ONIKS publ., 2011. 243 p.
- [4] Kosov M.G., Kutin A.A., Saakian R.V., Cherviakov L.M. *Modelirovanie tochnosti pri proektirovanii tekhnologicheskikh mashin* [Simulation accuracy in the design of production machines]. Moscow, MSTU «STANKIN» publ., 1997. 104 p.
- [5] Kuznetsov A.P., Kosov M.G. Structural precision of metal-cutting machines. *Russian Engineering Research*, 2012, vol. 32, no. 5-6, pp. 482–490.
- [6] Korzakov A.A., Kosov M.G. Modelirovanie kontaktnoi zhestkosti poverkhnostei [Modeling of the contact stiffness of surfaces]. *Vestnik MGTU STANKIN* [Herald MSTU STANKIN]. 2008, no. 2, pp. 6–10.
- [7] Spirin V.A., Krasil'nikov M.A., Mikhailov A.A. Metodologiya kompleksnogo rascheta tochnosti obrabotki dlia tokarnykh stankov s CHPU [Integrated calculation methodology for processing precision CNC lathes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Vestnik State National Research Polytechnic University of Perm]. 2012, vol. 14, no. 2, pp. 77–89.
- [8] Kol'tsov A.G. Metodika postroeniia matematicheskoi modeli tochnosti tekhnologicheskogo oborudovaniia na baze mnogooperatsionnogo stanka [Method of constructing a mathematical model of precision manufacturing equipment based on multi-operational machine]. *Vestnik UGATU* [Herald USATU]. 2013, vol. 17, no. 8(61), pp. 106–116.
- [9] Belugin Iu.F., Kondrashov A.G. *Sposob zakrugleniia tortsov zub'ev zubchatykh koles (varianty)* [A method of rounding the ends of the gear teeth (variants)]. Patent RF no. 2318636, МПК В 23 F 19/10, 2008.

## Информация об авторах

**КОНДРАШОВ Алексей Геннадьевич** (Казань) — кандидат технических наук, доцент кафедры Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств. Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (423812, Набережные Челны, Российская Федерация, пр. Мира., д. 68/19, e-mail:kondrashovag@mail.ru).

**САФАРОВ Дамир Тамасович** (Казань) — кандидат технических наук, доцент кафедры Материалов, технологий и качества. Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (423812, Набережные Челны, Российская Федерация, пр. Мира., д. 68/19, e-mail: DTSafarov@kpfu.ru).

## Information about the authors

**KONDRASHOV Aleksey Gennad'evich** (Kazan) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Design and Technology Support in Engineering Industries» Department. Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University (Mira str., 68/19, 423812, Naberezhnye Chelny, Russian Federation, e-mail: kondrashovag@mail.ru).

**SAFAROV Damir Tamasovich** (Kazan) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Materials, Technology, and Quality» Department. Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University (Mira str., 68/19, 423812, Naberezhnye Chelny, Russian Federation, e-mail: DTSafarov@kpfu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография  
**С.В. Грубого**

### «Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами»

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса резания и изнашивания инструментов. Проведено математическое моделирование процесса и дана методика многофакторной аппроксимации полиномиальными уравнениями экспериментальных зависимостей резания металлов. Выполнен анализ методов и рассмотрены типовые задачи оптимизации режимных параметров. Разработаны математические основы оптимизации и управления режимными параметрами механической обработки с использованием уравнений скорости изнашивания инструментов.

**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