

И. А. Киселев

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ 3МЗВЛ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ. МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ

Приведен анализ геометрических алгоритмов, использованных для моделирования процесса фрезерования. Предложена оригинальная модификация алгоритма, которая объединяет достоинства и свободна от ряда недостатков других методов.

E-mail: i.a.kiselev@yandex.ru

Ключевые слова: *пятикоординатное фрезерование, алгоритм геометрического моделирования, буфер глубины, октарное дерево, система с запаздыванием.*

При проектировании технологического процесса обработки резанием тонкостенных деталей (например, лопаток газотурбинного двигателя) большую роль играет выбор рациональных режимов, обеспечивающих наименьшие вибрации инструмента и заготовки. Такие режимы могут быть определены с использованием моделирования динамики фрезерования на многокоординатных станках. При правильном подборе режимов не только достигаются наименьших вибраций, но и компенсируются погрешности формы деталей на этапе разработки управляющей программы станка. С помощью моделирования удастся значительно сократить объем экспериментальных исследований для отладки техпроцесса. В то же время такие детали, как лопатки газотурбинных двигателей, обладают сложной пространственной геометрической формой, инструмент также имеет сложную геометрию режущей кромки, движение подачи осуществляется по криволинейной пространственной траектории. Для описания движения, срезаемого слоя, новых поверхностей обрабатываемой детали требуется разработка специальных численных алгоритмов, которые применимы и для расчета сил резания при моделировании динамики процесса обработки.

Общий подход к моделированию динамики фрезерования описан в работе [1]. Исходными данными для моделирования являются результаты работы CAD/CAM-системы, в которой проведен первичный расчет маршрута обработки — твердотельная модель заготовки, траектория движения инструмента и его геометрические характеристики. Имитационная модель включает в себя динамическую модель заготовки, динамическую модель фрезы, численный алгоритм геомет-

рического моделирования и вспомогательные блоки (модель сил резания и модуль настройки конечно-элементной модели по результатам экспериментального модального анализа). Результаты расчета дают возможность оценить уровень вибраций, отклонение формы и качество поверхности, а также величины сил резания при различных сочетаниях параметров технологического процесса.

С помощью алгоритма геометрического моделирования объединена работа остальных модулей имитационной модели с учетом механизма запаздывания в системе, осуществляется расчет распределения толщины срезаемого слоя вдоль режущих кромок, необходимого для вычисления сил резания, а также происходит формирование новой поверхности заготовки с высокой степенью детализации. От точности работы алгоритма геометрического моделирования зависит точность расчета динамического режима системы в целом, время моделирования зависит от уровня вычислительных затрат. Кроме того, алгоритм должен быть достаточно универсальным — обеспечивать моделирование образования поверхностей деталей с произвольной пространственной формой при различных технологических процессах (при фрезеровании, шлифовании, сверлении, точении, хонинговании и др.).

Данная статья посвящена разработке алгоритма геометрического моделирования для процессов лезвийной обработки, удовлетворяющего сформулированным выше требованиям. Этот алгоритм состоит из трех основных частей: методики описания и хранения поверхности заготовки, модуля изменения поверхности заготовки при срезании материала и модуля вычисления распределения толщины срезаемого слоя вдоль режущих кромок инструмента. В данной работе приведен также обзор литературных источников, в которых рассмотрено применение различных алгоритмов геометрического моделирования в технологии пятикоординатного фрезерования, дана методика описания и хранения поверхности заготовки. Алгоритмы изменения поверхности и расчета толщины срезаемого слоя представлены в работе [2].

Обзор алгоритмов геометрического моделирования для многокоординатного фрезерования. Наиболее распространенными численными методами геометрического моделирования пространственного фрезерования при четырех- и пятикоординатной обработке являются алгоритм конструктивной твердотельной геометрии (CSG — constructive solid geometry) [3—12], алгоритм октарного дерева (octree) [13, 14] и алгоритм буфера глубины (Z-буфер) [15—22].

Метод CSG широко применяется в современных комплексах программ твердотельного моделирования (CAD-системы). Основная идея метода заключается в том, чтобы представить сложный геометрический объект с помощью последовательности булевых операций

над набором геометрических примитивов, таких как параллелепипед, сфера, цилиндр и т. д.

Начало применения методики CSG к моделированию фрезерования было положено при верификации G-кода, разрабатываемого в САМ-системе [3]. Маршрут движения инструмента разбивали на участки, модель фрезы представляла собой тело вращения (без учета текущего положения режущих кромок),двигающееся по заданной траектории. С помощью метода CSG на каждом шаге движения инструмента проводили вычисление пересечения объемной модели заготовки и объемной модели инструмента, удаление срезаемого слоя из модели заготовки. Результатом работы программы являлась твердотельная модель конечной поверхности детали после обработки. В работах [4—7] метод CSG был адаптирован для расчета сил резания на основе вычисления скорости удаления материала, что дало возможность рассчитывать средние значения сил резания и крутящих моментов, необходимых для осуществления операции. В то же время для моделирования динамики процесса фрезерования следует более точно определять силы резания.

Указанные недостатки были позже устранены в многочисленных исследованиях [8—10 и др.], в которых метод CSG применяли для моделирования пятикоординатного фрезерования. Недостатки подхода CSG, отмеченные в работах [6, 7, 11], связаны со сложной структурой хранения данных и высокой вычислительной сложностью. По оценке, приведенной в работе [12], вычислительная сложность алгоритма составляет $O(m^4)$, где m — число положений фрезы. В случае если не моделировать динамику процесса (т. е. не проводить интегрирование дифференциальных уравнений движения), число положений фрезы относительно невелико: оно определяется количеством кадров в соответствующем G-коде. При интегрировании уравнений движения модели и учете регенерации поверхности необходимо принимать во внимание положение фрезы в каждой точке интегрирования по времени, что осложняет работу алгоритма CSG.

Точность метода CSG является высокой при верификации управляющих программ для станков с ЧПУ, а также при расчете скорости удаления материала, если не требуется учитывать вибрации инструмента или обрабатываемой детали. В этом случае алгоритм может приводить к преждевременному удалению материала, поскольку вместо прохождения отдельных режущих кромок моделируется срезание материала оболочкой (оггибающим телом вращения) фрезы. Некорректное удаление материала, в свою очередь, повлияет на величины сил резания при проходе следующей режущей кромки. В результате адекватное моделирование динамики процесса резания может нарушиться.

Метод октарного дерева [13, 14] основан на вложенной рекурсивной системе хранения информации об атрибутах элементарных объемов кубической формы (вокселей), составляющих в совокупности объем заготовки. Куб первого уровня выбирают таким образом, чтобы он полностью включал в себя модель заготовки. Далее воксель разбивают плоскостями симметрии на восемь (отсюда и название — «окта») более мелких кубов — узлов вокселя. При этом каждый из них может находиться в одном из трех состояний: полностью заполнен материалом детали, полностью пуст или частично заполнен. Частично заполненные узлы разбивают повторно, и процедура повторяется, увеличивая вложенность структуры, до достижения необходимой точности описания заготовки. Очевидно, что при таком методе построения сгущение и измельчение вокселей происходит вблизи границ тела, таким образом удается избежать хранения избыточных данных. Кроме того, информацию об узлах одного вокселя удается хранить всего в 2 байтах памяти, что приводит к дополнительной экономии ресурсов оперативной памяти.

С точки зрения моделирования процесса обработки резанием одним из существенных недостатков метода является нулевой порядок аппроксимации поверхности детали, т. е. в рамках каждого граничного вокселя уровень поверхности заготовки считается постоянным. Это приводит к «ступенчатой» форме аппроксимации, что снижает точность определения толщины срезаемого слоя и усилий резания. Другим недостатком является невозможность установить положение выбранной точки режущей кромки относительно октарной модели без применения многошаговых процедур поиска, что обусловлено вложенной структурой хранения данных. Указанные выше недостатки могут приводить к существенному увеличению вычислительных затрат для достижения необходимой точности моделирования.

Метод Z-буфера был разработан для получения экранных изображений твердотельных моделей в компьютерной графике, он широко применяется в САД-системах и других графических программах. Впервые метод буфера глубины для отображения формы рельефных поверхностей применил Р. Андерсон [15]. Дальнейшие исследования [16—18] были направлены на расширение возможностей метода и повышение его производительности; метод Z-буфера применяли для вычисления объема материала, удаляемого с заготовки в процессе фрезерования, однако его не использовали для расчета усилий резания. Этот недостаток устранен в работах [19—21]: геометрический метод вычисления толщины срезаемого слоя на основе Z-буфера был объединен с разработанными ранее моделями сил резания для фрез со сложной геометрией режущей кромки. Кроме того, в работе [20]

также учитывали отклонения фрезы, обусловленные силами резания при моделировании 2,5-осевого фрезерования.

Рассмотрим работу традиционного метода Z-буфера и его модификаций на примере описания геометрической формы заготовок с формой поверхности, показанной на рис. 1, *а*. Поверхность № 1 является однозначной функцией координат при любом выборе системы координат (при любом «направлении взгляда» на эту поверхность). Описание такой поверхности методом Z-буфера показано на рис. 2, *а*. В этом случае выбирают направление проецирования Z (направление взгляда на поверхность) и положение перпендикулярной ему плоскости проецирования XY. Положение плоскости проецирования выбирают так, чтобы весь объем заготовки располагался по одну сторону от нее. На плоскости проецирования производят построение регулярной сетки с заранее выбранным размером шага в прямоугольной области, ограничивающей проекцию детали на данную плоскость.

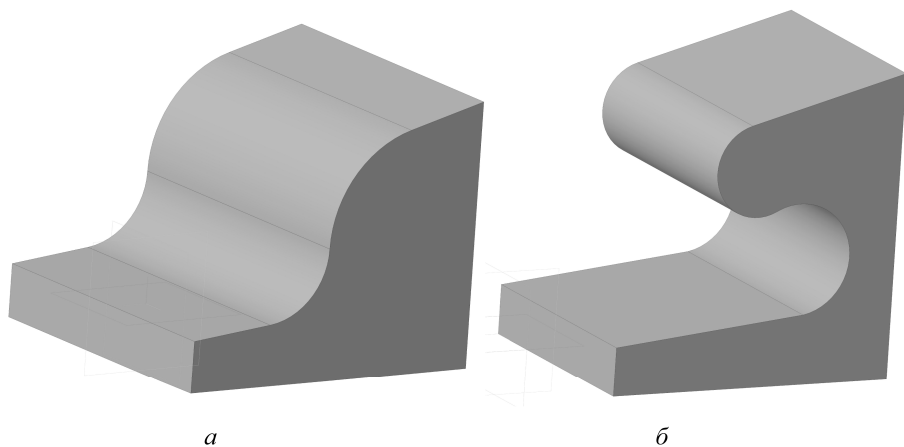
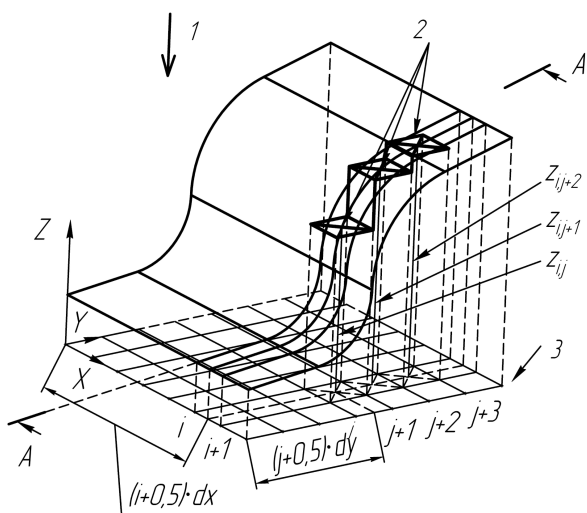


Рис. 1. Пример заготовки с типом поверхности № 1 (*а*) и № 2 (*б*)

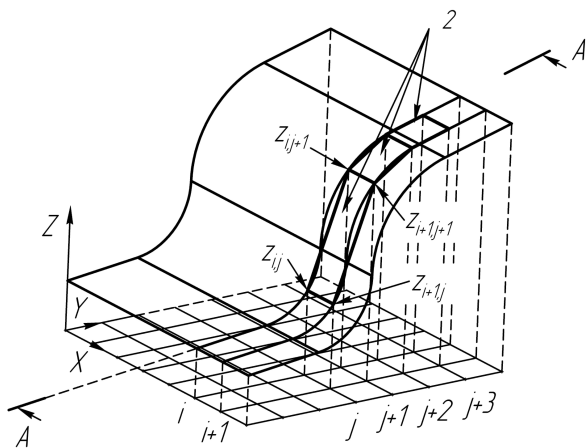
Нумерацию ячеек проводят по минимальным индексам вдоль осей координат на плоскости проецирования. Затем из центра каждой ячейки проводят отрезок вдоль направления проецирования (Z-направления) до пересечения с поверхностью заготовки. Полученная длина отрезка является координатой поверхности над точкой проецирования в выбранной системе координат. Данную координату поверхности считают постоянной (это является приближением) в пределах ячейки Z-буфера и таким образом строят Z-элемент, имеющий форму параллелепипеда. В качестве примера на рис. 2, *а* показано построение трех Z-элементов с номерами (i, j) , $(i, j + 1)$, $(i, j + 2)$.

Высоту ячейки с номером (i, j) определяет Z-координата поверхности над точкой с координатами $x = (i + 0,5)dx$; $y = (j + 0,5)dy$, соответствующей центру ячейки. Поскольку характеристики Z-элементов

та описываются положением единственной точки (т. е. Z -координатой соответствующей точки аппроксимируемой поверхности) внутри его объема, то каждый Z -элемент является самостоятельным и его состояние не зависит от соседних Z -элементов. Таким образом, топология поверхности не определяется. На рис. 2, *a* видно, что с увеличением угла наклона поверхности заготовки к плоскости проецирования точность аппроксимации по методу Z -буфера снижается. Кроме того, аппроксимация поверхности заготовки является разрывной, что создаст трудности при определении толщины срезаемого слоя вдоль режущей кромки инструмента.



a



б

Рис. 2. Описание модели заготовки с типом поверхности № 1 различными методами:

a — традиционным методом Z -буфера; *б* — методом MZBL; 1 — направление проецирования; 2 — ячейки поверхности; 3 — плоскость проецирования

Очевидно, что при таком подходе точность аппроксимации обрабатываемой поверхности будет зависеть от степени подробности разбиения. С ростом числа разбиений вычислительные затраты на моделирование растут квадратично, что является недостатком метода. В некоторых работах, например [22], представлены модификации алгоритма, повышающие точность аппроксимации меньшей ценой: за счет дополнительных локальных разбиений сетки. Однако в этом случае теряется главное качество алгоритма буфера глубины — быстрая (без итераций) навигация по модели поверхности.

Поверхность второго типа (рис. 1, б) представляет собой неоднозначную функцию координат, т. е. невозможно так выбрать систему координат проецирования, чтобы поверхность заготовки была видна полностью. Для такой поверхности аппроксимация по методу Z-буфера не может быть получена с удовлетворительной точностью даже при измельчении шага аппроксимации ввиду наличия невидимых областей (рис. 3, а).

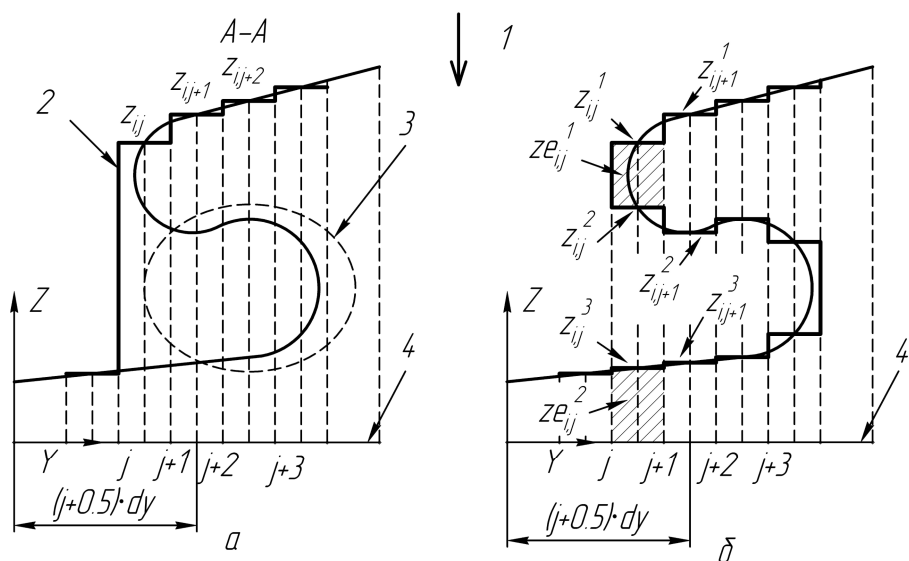


Рис. 3. Описание модели заготовки с типом поверхности № 2 в сечении А-А различными методами:

а — стандартным методом Z-буфера; *б* — многоуровневым методом Z-буфера; 1 — направление проецирования; 2 — погрешность проецирования; 3 — невидимая область поверхности; 4 — плоскость проецирования

Для того чтобы избежать погрешностей, показанных на рис. 3, а, в работе [21] предложен метод расширенного Z-буфера для описания сложных поверхностей, которые невозможно увидеть полностью с одного выбранного направления взгляда. Такой метод обычно необходимо применять при моделировании пятикоординатного фрезеро-

вания. В этом случае определяют все точки пересечения луча, проведенного из центра выбранной ячейки Z -буфера, с аппроксимируемой поверхностью. Построение Z -элемента между соседними точками пересечения производят только в том случае, если между ними находится материал заготовки (тело детали). Таким образом, одной ячейке Z -буфера может соответствовать несколько Z -элементов.

В качестве примера на рис. 3, б штриховкой выделены два Z -элемента $ze_{i,j}^1$ и $ze_{i,j}^2$, соответствующих ячейке (i, j) . Элемент $ze_{i,j}^1$ ограничен точками $z_{i,j}^1$ и $z_{i,j}^2$ пересечения направления проекции, проведенного из центра ячейки (i, j) , поскольку между данными точками располагается материал детали. В свою очередь, элемент $ze_{i,j}^2$ ограничен точками $z_{i,j}^3$ и $z_{i,j}^4$. Между точками $z_{i,j}^2$ и $z_{i,j}^3$ материал детали отсутствует, поэтому они не образуют нового Z -элемента. В рассмотренном примере нумерация точек пересечения и Z -элементов ведется последовательно в направлении проецирования (сверху вниз).

Алгоритм геометрического моделирования 3MZBL. Несмотря на то что многоуровневый метод Z -буфера позволяет создавать модели заготовок со сложной геометрией поверхности в достаточно общем случае, его очевидным недостатком является нулевой порядок аппроксимации. Иными словами, в рамках каждого Z -элемента координата описываемой поверхности является константой и терпит разрыв на границе между соседними элементами. При таком подходе для достижения точности описания поверхности, достаточной для работы алгоритма определения толщины срезаемого слоя с учетом вибраций инструмента, необходимо существенно измельчать шаг сетки Z -буфера, что приводит к квадратичному росту вычислительных затрат и требуемой оперативной памяти для описания поверхности. Для того чтобы снизить зависимость от размера ячейки дискретной модели заготовки, в данной работе предлагается модифицировать метод Z -буфера так, чтобы он обеспечивал аппроксимацию первого порядка точности. С этой целью определяют пересечения с аппроксимируемой поверхностью всех лучей, проведенных из узлов сетки на плоскости проецирования в направлении проекции, т. е. для каждой ячейки Z -буфера значения координаты поверхности определяют в четырех угловых точках.

В рамках каждого Z -элемента для аппроксимации поверхности заготовки предлагается использовать билинейные функции формы, что позволит вычислять координаты поверхности в любой точке ячейки Z -буфера по четырем угловым значениям (более подробное описание будет приведено в продолжении данной статьи). Предлага-

емый подход будем называть многоуровневым Z -буфером с билинейной аппроксимацией (Multilevel Z -buffer with Bi-Linear approximation — MZBL), а его одноуровневый аналог обозначим ZBL. На рис. 2, б показан пример модели заготовки с типом поверхности № 1, полученной с помощью метода MZBL.

В методе MZBL каждый Z -элемент является аппроксимацией толщины детали в направлении проецирования над выбранной точкой сетки проецирования Z -буфера. Границами Z -элемента являются точки на поверхности детали. В данном случае Z -буфер не является описанием объема и формы поверхности детали в отличие от традиционного метода Z -буфера, где каждый Z -элемент аппроксимирует объем детали над ячейкой сетки проецирования, и, соответственно, его границы аппроксимируют поверхность детали. В случае использования методов ZBL и MZBL для построения поверхности детали требуются специальные алгоритмы, позволяющие определить топологию поверхности, т. е. выяснить, какие из соседних Z -элементов (точнее, их границ) образуют ячейку поверхности детали. В рамках одноуровневой схемы (ZBL) для определения топологии поверхности достаточно соединить между собой границы соседних Z -элементов, расположенных по углам выбранной ячейки сетки проецирования. На рис. 2, б приведен пример построения ячейки поверхности с номером (i, j) , образованной границами $z_{i,j}, z_{i,j+1}, z_{i+1,j+1}, z_{i+1,j}$ соседних Z -элементов $ze_{i,j}, ze_{i,j+1}, ze_{i+1,j+1}, ze_{i+1,j}$.

В случае многоуровневого Z -буфера соседним точкам на плоскости проекции может соответствовать различное число Z -элементов, таким образом, можно построить ячейку поверхности различными способами, т. е. появляется неоднозначность описания поверхности. Примеры возможных вариантов ошибочного построения ячеек поверхности показаны на рис. 4, а для ячеек $(i, j - 1)$ и (i, j) сетки проецирования. Для того чтобы исключить ошибочные варианты построения ячеек поверхности, введем следующие ограничения.

1. *Ячейка поверхности может быть образована только одновременно четырьмя начальными или четырьмя конечными точками соседних Z -элементов, расположенных по углам ячейки сетки проецирования.*

При выбранном способе построения Z -буфера каждой точке сетки проецирования соответствует последовательность координат точек пересечения с поверхностью детали в Z -направлении. Данную последовательность будем записывать в порядке возрастания Z -координаты и назовем Z -массивом, который всегда содержит четное число точек. Первая точка Z -массива всегда является точкой входа в материал детали, что обусловлено выбором системы координат проеци-

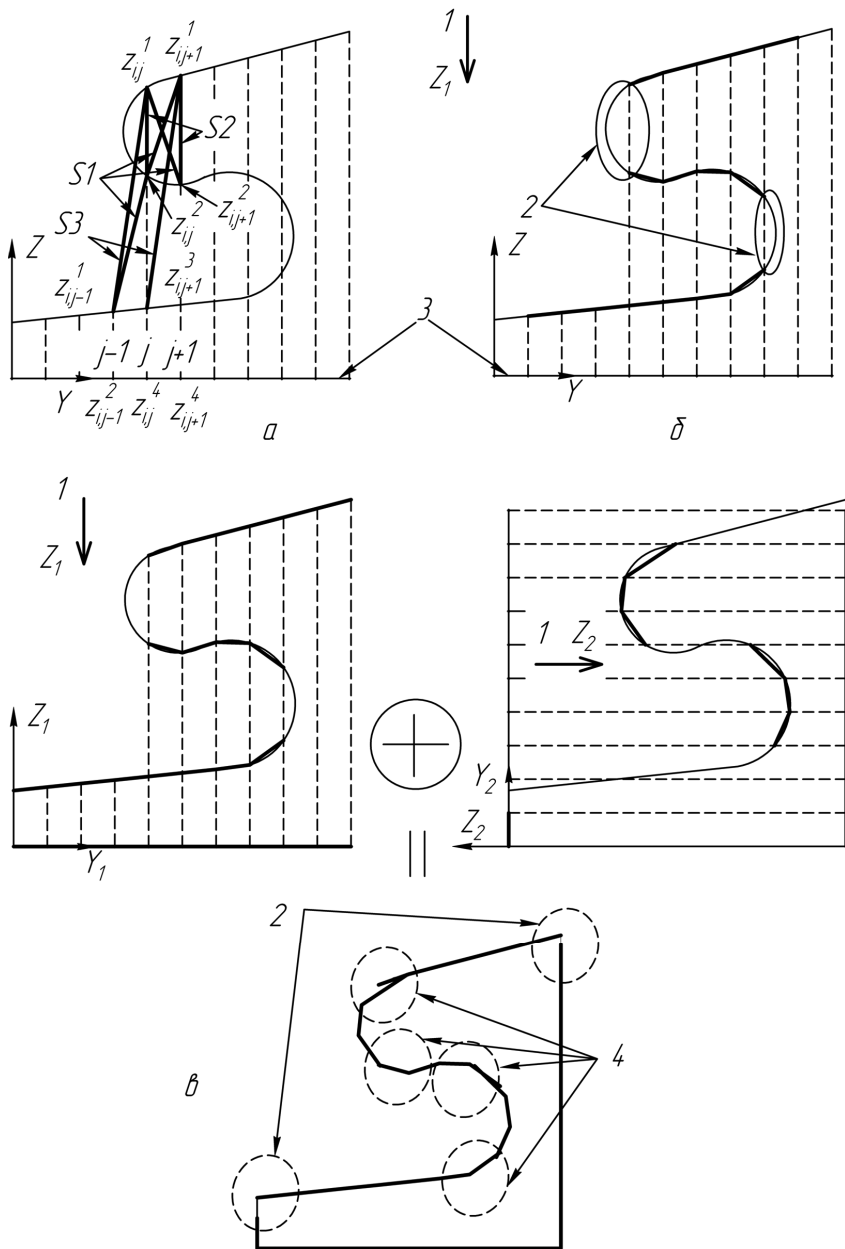


Рис. 4. Аппроксимация поверхности № 2 методом MZBL:

а — ошибочные ячейки поверхности, если не учтены ограничения; *б* — с учетом ограничений; *в* — с учетом двух направлений проецирования; 1 — направление проецирования; 2 — неаппроксимированная область поверхности; 3 — плоскость проецирования; 4 — зоны перекрытия

рования. Таким образом, все точки *Z*-массива с нечетными номерами являются начальными точками *Z*-элементов, а с четными номерами — конечными точками. В случае если луч в направлении проеци-

рования, проведенный из узла сетки проецирования, проходит по касательной к поверхности детали, в Z -массив заносятся две точки пересечения с одинаковыми Z -координатами, т. е. формируется Z -элемент нулевой длины. Следовательно, ограничение 1 гарантирует, что четыре точки, образующие ячейку поверхности, лежат на одной стороне детали, и исключает появление ошибочных ячеек типа $S1$ и $S2$ (см. рис. 4, *а*).

2. *Максимальная разность Z координат угловых точек ячейки поверхности не должна превышать некоторого заранее заданного значения.*

Данное ограничение исключает возможность появления ошибочных ячеек типа $S3$ (см. рис. 4, *а*). Для стабильной работы алгоритма ограничение на допустимую разность Z координат в пределах ячейки следует выбирать вдвое меньше характерной толщины стенки детали.

3. *Максимальный угол наклона ребра ячейки поверхности к плоскости, перпендикулярной направлению проецирования, не должен превышать заранее заданного значения.*

Ограничение на угол наклона позволяет исключить ячейки, плохо аппроксимирующие поверхность детали, в тех областях, где касательная плоскость к поверхности детали и направление проецирования составляют малый угол (менее $10...15^\circ$). В результате, с одной стороны, повышается точность аппроксимации, с другой — появляются области поверхности детали, которые оказываются не аппроксимированными при выбранном направлении проецирования. Следует отметить, что ограничения 2, 3 и шаг сетки на плоскости проецирования являются связанными величинами. Например, при достаточно малом шаге сетки и большой допустимой разности Z -координат, ограничение 3 будет срабатывать раньше ограничения 2.

Аппроксимация поверхности детали, полученная по методу MZBL с описанными выше ограничениями, свободна от ошибочных ячеек (рис. 4, *б*). При этом основная проблема метода заключается в том, что аппроксимация детали не является полной из-за наличия невидимых областей и зон, в которых угол между нормалью к поверхности детали и направлением проецирования слишком велик.

Для того чтобы получить полную модель поверхности детали в данной работе предлагается одновременно использовать три взаимно ортогональных направления проецирования, т. е. фактически три Z -буфера. Такой метод будем называть 3MZBL. В этом случае области, невидимые (или не удовлетворяющие ограничениям 2 и 3) с одного направления проецирования, обязательно станут видны с одного из двух оставшихся направлений проецирования. При этом

часть областей детали может быть аппроксимирована одновременно с двух или трех направлений проецирования. Такие области будем называть зонами перекрытия. Для того чтобы обеспечить перекрытие, ограничение на угол наклона должно быть не менее 45° . Для надежной работы алгоритма в качестве ограничения 3 рекомендует-ся выбирать угол 60° , гарантирующий высокое качество описания поверхности, с одной стороны, и достаточное перекрытие поверх-ностей, полученных с разных направлений проецирования, — с дру-гой. В зависимости от типа детали может быть выбрано различное число направлений проецирования: два, например, в случае если необходимо аппроксимировать только боковую поверхность тела вращения; больше трех — если требуется получить более высокое качество аппроксимации для деталей со сложной разветвленной геометрией и большим количеством изломов. Качество аппрокси-мации может быть дополнительно повышено за счет отдельного выбора шага сетки для разных направлений проецирования. Напри-мер, при построении модели детали типа пластины для направления проецирования, перпендикулярного ее поверхности, шаг сетки мо-жет быть существенно крупнее, чем для направлений проецирова-ния, перпендикулярных ее ребрам.

На рис. 4, в приведен пример двумерного описания поверхности № 2 с использованием двух ортогональных направлений проециро-вания. В этом случае получена полная аппроксимация детали, сво-бодная от недостатков, показанных на рис. 4, б. Наличие неаппрок-симированных областей в углах детали обусловлено слишком круп-ным шагом сетки в данном, искусственно сконструированном примере. При более мелком шаге в зоне угла ограничения 2, 3 будут выполнены, и аппроксимация будет иметь зоны перекрытия. Опи-санный метод полностью применим для построения геометрических моделей трехмерных тел: для полного описания поверхности детали требуется выбирать не менее трех направлений проецирования.

Алгоритм построения ячеек поверхности детали на основе Z-бу-фера по методу 3MZBL с учетом введенных выше ограничений представлен на рис. 5. Поскольку для всех направлений проециро-вания и всех ячеек сетки проецирования работа алгоритма одинако-ва, ограничимся рассмотрением последовательности действий для одной ячейки сетки проецирования. Для иллюстрации работы алго-ритма в пространственном случае на рис. 6 показан пошаговый про-цесс построения двух ячеек поверхности на примере одной ячейки сетки проецирования. Соответствующие угловым точкам ячейки сетки проецирования Z-массивы состоят из различного числа точек (шаг 1–1).

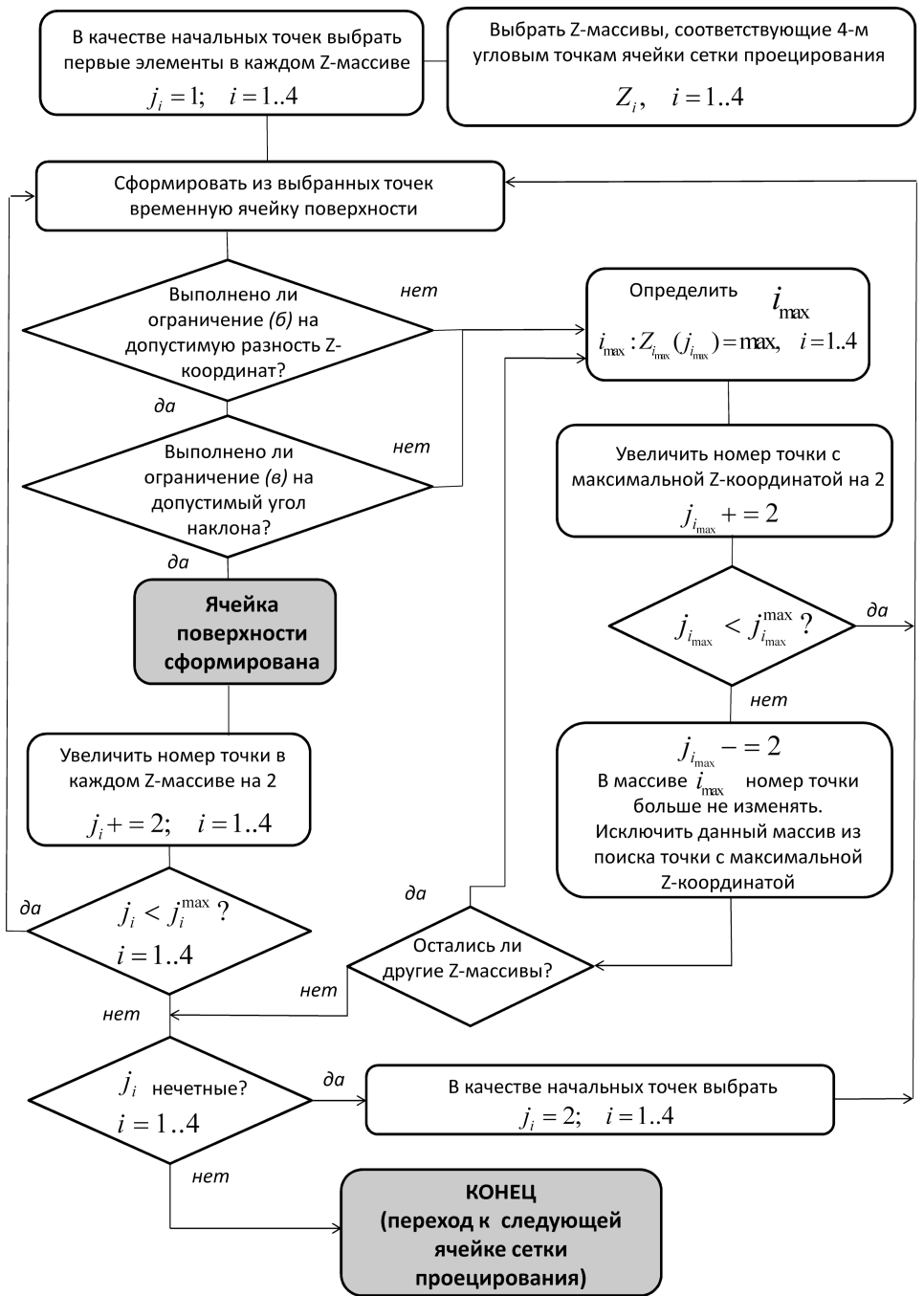
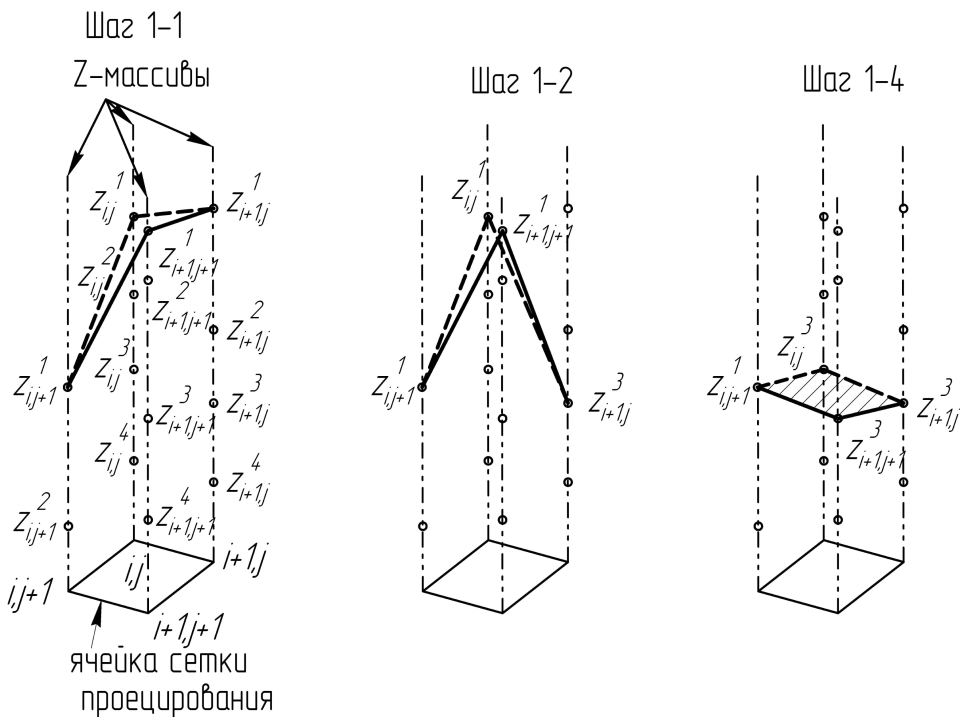


Рис. 5. Алгоритм построения поверхности по методу 3MZBL (для одного направления проецирования и для одной ячейки сетки проецирования)

Поиск по нечетным элементам Z-массивов (начало материала)



Поиск по четным элементам Z-массивов (конец материала)

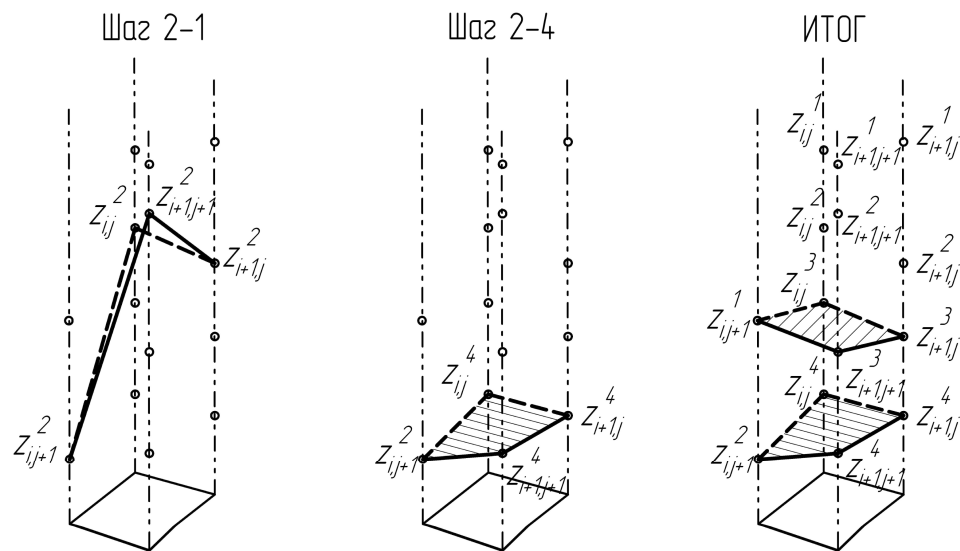


Рис. 6. Пример построения ячеек поверхности для одной ячейки сетки проецирования (шаги 1-3; 2-2; 2-3 не показаны)

Для построения ячеек поверхности в соответствии с алгоритмом (см. рис. 5) необходимо производить построение временных ячеек поверхности и затем анализировать выполнение для них введенных выше ограничений 2, 3. Если ограничения выполнены, то считают, что ячейка поверхности найдена, и можно переходить к поиску следующей ячейки. Поскольку также должно соблюдаться ограничение 1, поиск проводят в два этапа. На первом этапе в качестве начальных точек выбирают первые элементы Z -массивов и дальнейший поиск проводят только по их нечетным элементам, соответствующим точкам входа в материал детали луча проецирования (шаги 1–1 — 1–4 на рис. 6). На втором этапе в качестве начальных точек выбираются вторые элементы Z -массивов, и поиск проводится только по их четным элементам, т. е. по точкам выхода луча проецирования из тела детали (шаги 2–1 — 2–4 на рис. 6). Если в результате работы алгоритма найдена ячейка поверхности (т. е. все ограничения выполнены), то индексы всех четырех Z -массивов увеличивают на 2. Так осуществляется переход к анализу точек, оставшихся в этих массивах. Если хотя бы одно из ограничений не выполнено, то на 2 увеличивают только индекс в том Z -массиве, текущая точка которого имеет максимальную Z -координату. Таким образом перебирают все возможные комбинации имеющихся точек для построения ячеек поверхности.

В качестве первого примера модели трехмерного тела рассмотрим модель шара (рис. 7), полученную с помощью метода 3MZBL. При этом примем ограничение на угол наклона ячейки поверхности, равное 30° . В данном случае остаются разрывы между поверхностями, формируемыми с разных направлений проецирования.

На рис. 8 в качестве второго примера представлена модель тора, демонстрирующая работу алгоритма при различном количестве Z -элементов в разных точках сетки проецирования. Ограничение на угол наклона ячейки поверхности принято равным 70° , что позволяет создать зону перекрытия достаточного размера. В данном случае для получения качественной модели использован более мелкий шаг сетки проецирования Z -буфера по сравнению с шагом в предыдущем примере.

Модели, приведенные на рис. 7 и 8, получены с помощью программ на языке C++, разработанных на основе описанных выше алгоритмов. Визуализация выполнена в свободно распространяемом программном комплексе Paraview 3.14. Для отображения каждая четырехугольная ячейка поверхности представлена двумя плоскими треугольными элементами. Однако в действительности ячейка поверхности описывается на основе координат ее угловых точек с помощью билинейных функций формы и именно в таком виде участвует в алгоритме определения толщины срезаемого слоя.

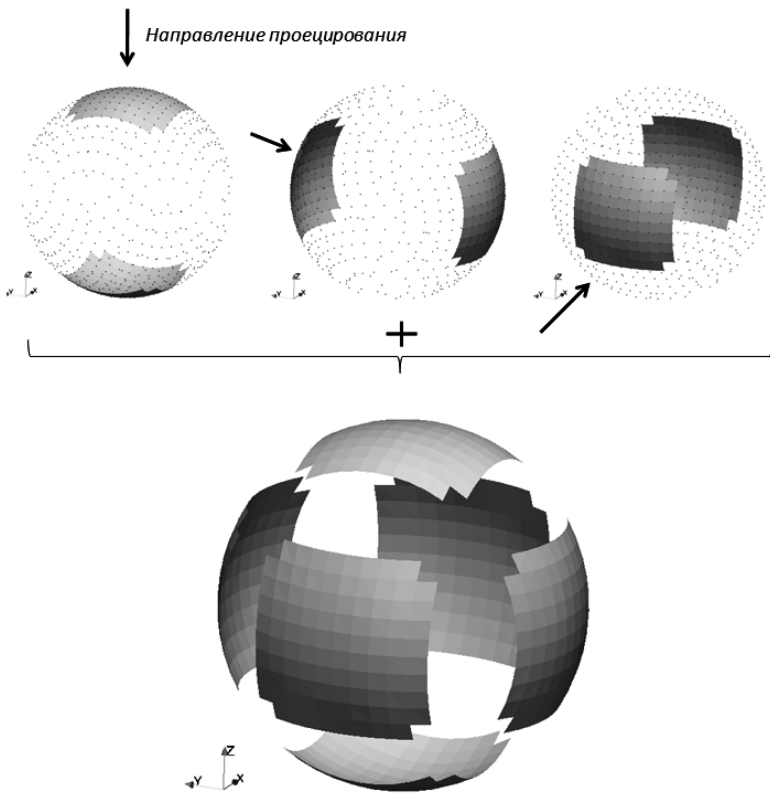


Рис. 7. Модель шара, полученная с помощью метода 3MZBL с ограничением на угол наклона ячейки 30°

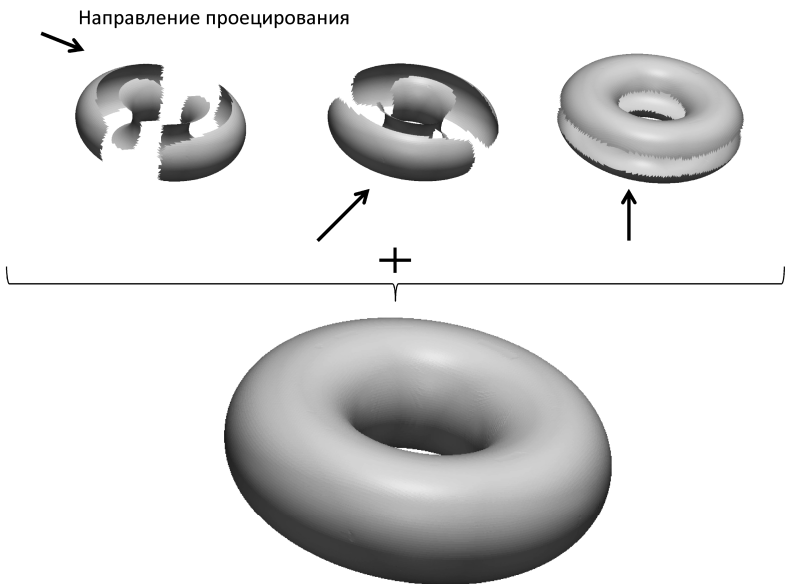


Рис. 8. Модель тора, полученная с помощью метода 3MZBL с мелкой сеткой проецирования и ограничением на угол наклона ячейки 70°

Предложенный выше подход к построению геометрической модели обрабатываемой детали является достаточно общим и позволяет получать модели деталей с практически произвольной формой. В то же время этот метод является достаточно экономичным, поскольку за счет регулярной сетки проецирования по каждому из направлений позволяет осуществлять одношаговую навигацию по массиву данных, описывающему поверхность детали. Поскольку сохраняется информация только об элементах поверхности детали, удается избежать хранения избыточных данных. Недостатки традиционного алгоритма Z-буфера устранены за счет введения билинейной аппроксимации поверхности в рамках ячейки сетки проецирования и одновременного использования трех ортогональных направлений проецирования. Для того чтобы использовать метод 3MZBL в процессе моделирования динамики фрезерования сложнопрофильных податливых деталей, требуется дополнительно применять алгоритм изменения поверхности детали при прохождении режущих кромок и алгоритм определения мгновенной толщины срезаемого слоя в каждой точке на режущей кромке инструмента. Продолжение данной статьи будет посвящено обсуждению этих алгоритмов и рассмотрению примера моделирования процесса фрезерования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов С.А., Киселев И.А., Аршинов С.В. Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. Спец. вып. № 6. – С. 50–69.
2. Воронов С.А., Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием: Алгоритм изменения поверхности и определения толщины срезаемого слоя// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. Спец. вып. № 6. – С. 70–83.
3. Voelcker H.B., Hunt W.A. The role of solid modelling in machining process modelling and NC verification // SAE. Technical Report. – 1981. – 810195.
4. Wang K.K. Solid modelling for metal removal optimization of three-dimensional NC end milling // J. Manufacturing Systems. – 1988. – No. 7(1). – P. 57–65.
5. Wang K.K. Application of solid modelling to automate machining parameters for complex parts // Proc. of CIRP Manufacturing Seminar, Penn State. – 1987. – P. 33–37.
6. General geometric modelling approach for machining process simulation / H. El-Mounayri, M.A. Elbestawi, A.D. Spence, S. Bedi // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 1997. – No. 13. – P. 237–247.

7. Spence A.D., Altintas Y. A solid modeler-based milling process simulation and planning system // *Trans. ASME*. – 1994. – Vol. 116. – P. 61–69.
8. Weinert K.; Surmann T. Approaches for modelling engagement conditions in milling simulations // In: van Luttervelt C.A. (ed.). *4th CIRP International Workshop Modeling of Machining Operations*, Delft (The Netherlands), August 17–18, 2001. – P. 67–69.
9. Weinert K., Surmann T. Modelling of surface structures resulting from vibrating milling tools: Production Engineering – Research and Development // *Annals of the German Academic Society for Production Engineering*. – 2006. – Vol. XIII (2). – P. 133–138.
10. Surmann T., Enk D. Simulation of milling tool vibration trajectories along changing engagement conditions // *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – No. 47 (9). – P. 1442–1448.
11. Spence A.D., Abrari F., Elbestawi M.A. Integrated solid modeler-based solutions for machining // *Comput. Aided Des.* – 2000. – No. 32. – P. 553–568.
12. Methods for detecting errors in numerically controlled machining of sculptured surfaces / R.Jerard, R. Drysdale, K. Hauck, B. Schaudt, J. Magewick // *IEEE Comput. Graph. Appl.* – 1989. – No. 9 (1). – P. 26–39.
13. Pham T., Kim Y., Ko S. Development of a software for effective cutting simulation using advanced octree algorithm // *Proc. of the 2007 International Conference Computational Science and its Applications*. – P. 324–334.
14. Meagher D. Geometric modelling using octree method // *Comput. Graph. and Image Processing*. – 1982. – Vol. 19. – P. 129–147.
15. Anderson R.O. Detecting and eliminating collisions in NC 345 machining // *Comput. Aided Des.* – 1978. – No. 10 (2). – P. 231–237.
16. Hook T.V. Real-time shaded NC-milling display // *Proc. ACM*. – 1986. – No. 20 (4). – P. 15–20.
17. Hsu P.L., Yang W.T. Real-time 3D-simulation of 3-axis milling using isometric projection // *Compute. Aided Des.* – 1993. – No. 25 (4). – P. 215–224.
18. Jerard R.B., Fussell B.K., Ercan M.T. On-line optimization of cutting conditions for NC machining // *2001 NSF Design, Manufacturing and Industrial Innovation Research Conf.*, January 7–10, 2001.
19. Takata S., Tsai M.D., Inui M., Sata T. A cutting simulation system for machinability evaluation using a workpiece model // *Annals of the CIRP*. – 1989. – Vol. 38/1. – P. 417–420.
20. Kim G.M., Cho P.J., Chu C.N. Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2000. – No. 40. – P. 277–291.
21. Guzel B.U., Lazoglu I. Sculpture surface machining: A generalized model of ball-end milling force system // *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43 (5). – P. 453–462.
22. Lee S.K., Ko S.L. Development of simulation system for machining process using enhanced Z-map model // *J. of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 130–131. – P. 608–617.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012