

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ВОЗМОЖНОСТИ 2,5-КООРДИНАТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ ДЛЯ ПЛОСКОЙ ОБРАБОТКИ

**И.Е. Колошкина (Федеральный центр компетенций в сфере производительности труда)**

Приведены сведения о возможностях фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоской обработки при подготовке управляющих программ в САМ-системе за счет задания величины дискретного перемещения по оси Z. Рассмотрены варианты определения геометрических параметров качества поверхности в зависимости от условий 2,5-координатного фрезерования, приведены алгоритмы автоматизированного расчета.

Ключевые слова: обработка на станках с ЧПУ, 2,5-координатное фрезерование, программирование, САМ-система, неровности поверхности, компьютерное моделирование.

### Введение

При фрезеровании объемных изделий применяются 3...5-координатные станки с ЧПУ. Существенным недостатком такого вида обработки является высокая стоимость применяемого оборудования и, следовательно, стоимость обработки изделия. В то же время в станочном парке предприятий присутствует значительная часть фрезерных станков с ЧПУ для плоской обработки с возможностью программируемого дискретного перемещения по оси Z (рис. 1). Обработка объемных изделий на этом виде оборудования позволяет значительно снизить стоимость их работ [1, 2].

При программировании обработки в САМ-системе за счет задания величины дискретного перемещения по оси Z появляется возможность разрабатывать управляющие программы, обеспечивающие изготовление объемных изделий отдельных форм (наружных контуров с поверхностями, расположенными под углом к оси Z, конических отверстий и окон с наклонными стенками) 2,5-координатным фрезерованием на станках с ЧПУ для плоской обра-

ботки, что значительно удешевляет выполнение подобных работ [3, 4].

В соответствии с профессиональным стандартом Министерства труда РФ для специалиста по автоматизированной разработке технологий для станков с ЧПУ<sup>1</sup>, одной из обобщенных трудовых функций для пятого уровня квалификации (требования к образованию - бакалавриат), является «...автоматизированная разработка технологий и программ для 2 и 2,5-координатной обработки заготовок на станках с ЧПУ...». На основании этого требования вопрос исследования процесса 2,5-координатного фрезерования и разработки методов его освоения в процессе подготовки специалистов является актуальным. Такой вариант обработки экономически оправдан, так как стоимость нормо-часа при фрезеровании объемного изделия на станке для плоского фрезерования с размером стола 250x400 мм составляет 850 руб., а для фрезерования аналогичного изделия на станке для объемной обработки по трем осям такого же типоразмера – 1450 руб. (<https://kospas.ru/o-kompanii>). Согласно этим данным экономия может достигать 40% от нормо-часа.

Проблема использования 2,5-координатной фрезерной обработки объемных поверхностей осложняется отсутствием рекомендаций по управлению геометрическими параметрами качества поверхности в зависимости от вида заготовки, режущего инструмента и условий фрезерования.

Таким образом, для решения сформулированных проблем требуется определить влияние условий фрезерования, вида режущего инструмента и формы объемного изделия на геометрические параметры поверхности. Разработать математические зависимости, отражающие степень влияния условий фрезерования, формы заготовки, профиля режущей кромки фрезы на параметры неровностей на объемной поверхности. Разработать алгоритмы автоматизированного расчета условий фрезерования в зависимости от требований к качеству поверхности, предложить метод проектирования такой операции.

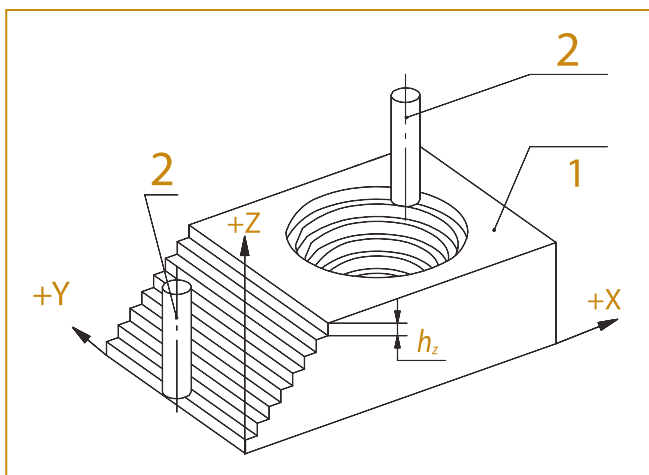


Рис. 1. Схемы 2,5-координатного фрезерования объемных изделий на станке с ЧПУ, где 1 – заготовка; 2 – фреза

<sup>1</sup> Приказ Министерства труда РФ от 02.07.2019 № 463н «Об утверждении профессионального стандарта “Специалист по автоматизированной разработке технологий и программ для станков с числовым программным управлением”».

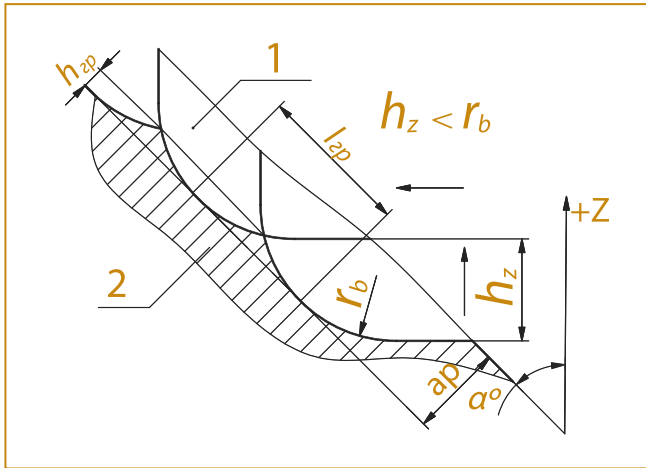


Рис. 2. Вид и условные обозначения параметров «гребешка» на наклонной поверхности после 2,5-координатного фрезерования, где 1 – контур режущей части фрезы; 2 – заготовка;  $h_{zp}$  – высота гребешка;  $r_b$  – радиус при вершине режущего инструмента;  $l_{gp}$  – длина основания гребешка;  $a_p$  – глубина резания

#### Форма неровностей поверхности в направлении оси Z и условия 2,5-координатного фрезерования, определяющие их формирование

Контур геометрии объемной поверхности в направлении оси Z после фрезерования, представляет собой остаточные следы перемещения фрезы и состоит из цепи неровностей («гребешков») [5]. Основными параметрами, описывающими «гребешок», являются – высота  $h_{zp}$ , длина основания  $l_{gp}$  и радиус бокового контура «гребешка», повторяющий радиусный профиль режущей кромки фрезы  $r_b$  (рис. 2). В соответствии с ГОСТ на шероховатость поверхности, высота «гребешка»  $h_{zp}$  численно равна наибольшей высоте профиля  $Rz$ , а длина основания «гребешка»  $l_{gp}$  – среднему шагу неровностей  $S_m$ , если  $l_{gp} < L_b$ , где  $L_b$  – базовая длина при измерении шероховатости.

Факторами, определяющими формирование шероховатости поверхности, являются: форма и состояние заготовки, параметры фрезы, режимы резания. В зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности и точности детали обработка может выполняться поэтапно – черновая и чистовая. На каждом этапе применяются фрезы различной конструкции: при черновой обработке – фрезы, оснащенные быстросменными неперетачиваемыми твердосплавными пластинами (НТП), при чистовой – фрезы с радиусной или сферической режущей частью [6]. Для исследований использованы фрезы концевые с механическим креплением четырехгранных неперетачиваемых твердосплавных пластин с главным углом в плане  $90^\circ$  и с радиусами при вершине 0,12; 0,20 и 0,30 мм, фрезы концевые с механическим креплением круглых пластин и сферическим концом с радиусами 4, 5 и 6 мм. Рассматривалось фрезерование наклонных поверхностей, расположенных под углами  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $75^\circ$ . Дискретность перемещений по оси Z равнялась 0,005 мм.

#### Определение геометрических параметров «гребешка» в зависимости от условий 2,5-координатного фрезерования

Определим параметры «гребешка», образуемого радиусными поверхностями, формируемыми контуром режущей кромки фрезы с НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине, применяемыми, как правило, при фрезеровании нежестких изделий или из легкодеформируемых при закреплении материалов. Такая обработка выполняется при задании минимальных перемещений  $h_z$  по оси Z для уменьшения силовой нагрузки на изделие при фрезеровании. Величина длины основания «гребешка»  $l_{gp}$  зависит от величины однократного перемещения фрезы по оси Z и угла наклона обрабатываемой поверхности заготовки  $\alpha^\circ$  относительно оси Z.

Из анализа расчетной схемы на рис. 2 определим длину основания «гребешка» при известной величине  $h_z$ :

$$l_{gp} (Sm) = h_z 10^3 / \cos \alpha^\circ \quad (1)$$

Из (1) следует, что предельный размер перемещения по оси Z, при котором контур формируется только радиусными поверхностями, образуется при обработке с величиной шага по оси Z при  $h_z \leq r_b$  для угла наклона поверхности  $\alpha^\circ \leq 45^\circ$  и  $h_z \leq 2 \cdot r_b \cdot (\cos \alpha^\circ)^2 \cdot \cos(90 - \alpha^\circ)$  для угла наклона поверхности  $\alpha^\circ > 45^\circ$ . Из рис. 2 определяем высоту «гребешка» в зависимости от известной величины перемещения по оси Z, полученное значение  $h_{zp}$  пересчитаем в показатели шероховатости  $Rz$  или  $Ra$ :

$$h_{zp}(Rz, Ra) = 0,5 \cdot (h_z \cdot 10^3 / \cos \alpha^\circ) \cdot \text{tg} \{0,5 \cdot \arcsin [(0,5 \cdot h_z) / (r_b \cdot \cos \alpha^\circ)]\} \quad (2)$$

При назначении условий 2,5-координатного фрезерования приходится решать обратную задачу – определение величины однократного перемещения фрезы  $h_z$  в зависимости от требований к качеству поверхности  $Rz$  или  $Ra$ , обозначенном на чертеже детали. Исходными данными для расчета являются угол наклона обрабатываемой поверхности  $\alpha^\circ$ , радиус при вершине НТП и требуемые параметры качества поверхности  $Rz$  или  $Ra$ . При этом высота гребешка для дальнейших расчетов численно принимает значения  $h_{zp} = Rz$  или  $h_{zp} = 4 \cdot Ra$  при  $Ra \geq 12,5$  мкм и  $h_{zp} = 5 \cdot Ra$  при  $Ra \leq 12,5$  мкм. Величина высоты «гребешка» рассчитывается как высота сегмента окружности с радиусом, равным радиусу режущей кромки фрезы, и хордой, равной длине основания «гребешка». Исходя из этого условия и анализа расчетной схемы на рис. 2, определяем необходимую величину однократного перемещения фрезы  $h_z$  для получения заданных параметров шероховатости:

$$h_z = 2 \cdot r_b \cdot \sin \{ \arccos [1 - h_{zp} / (r_b \cdot 10^3)] \} \cdot \cos \alpha^\circ \quad (3)$$

Длина основания «гребешка»  $l_{gp}$  в зависимости от рассчитанной величины  $h_z$  определяется по (1).

При определении параметров «гребешка» после 2,5-координатного фрезерования фрезой с радиусной или сферической режущей частью при черновой и чистовой обработке достаточно жестких деталей, допустимая высота однократного перемещения по оси Z (по рекомендациям компании Sandvik Coromant), не должна превышать 2/3 радиуса рабочей части режущей кромки. Определение величины основания «гребешка» для этих условий фрезерования выполняется по (1), а его высота рассчитывается по (2), где вместо значения радиуса при вершине режущей кромки подставляется значение радиуса сферической части фрезы  $r_{cf}$ . Величина однократного перемещения фрезы  $h_z$  по оси Z в зависимости от требований к качеству поверхности рассчитывается по (3).

Проверка достоверности приведенных выше зависимостей влияния условий 2,5-координатного фрезерования на параметры неровностей поверхности выполнялась масштабным компьютерным плоским и объемным моделированием подтвердила результаты разработанных методик.

**Алгоритмы определения условий 2,5-координатного фрезерования обеспечивающих параметры качества поверхности**

Для автоматизации расчетов параметров неровностей на поверхности объемного изделия в зависимости от условий обработки при 2,5-координатном фрезерования на станке с ЧПУ для плоского фрезерования разработан соответствующий алгоритм (рис. 3). Исходными данными для расчета параметров «гребешка» являются: величина  $h_z$ , угол наклона поверхности относительно оси Z и радиус режущей кромки фрезы  $r_6$  или радиус фрезы с радиусной или сферической формой режущей части  $r_{cf}$ . После ввода исходных данных в блоке 2 выполняется вычисление длины основания «гребешка». В блоке принятия решения 3 определяется дальнейшая схема расчета для фрезы с радиусной или сферической формой режущей части. Для НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине режущей кромки и  $\alpha^\circ < 45^\circ$  (блок 4) расчет продолжается при значении  $h_z \leq r_6 * 10^3$  (блок 5). Если величина заданного значения  $h_z$  превышает условия неравенства блока 5, выполняется перерасчет значения  $h_z$  в сторону уменьшения в блоке 7, далее определяются параметры «гребешка» в блоках 9-10. Для  $\alpha^\circ > 45^\circ$  аналогичные действия выполняются в блоках 6 и 8. В блоке 9 производится расчет угла дуги сегмента окружности с радиусом режущей части фрезы, ограниченным хордой, равной величине основания «гребешка». В блоке 10 производится расчет высоты «гребешка», в блоке 11 формируются результаты расчета - величина опорной части  $l_{cp}$  и высота «гребешка»  $h_{cp}$ . Эти показатели можно выразить в виде параметров шероховатости  $Sm$ ,  $Rz$  или  $Ra$ .

Алгоритм автоматизации решения обратной задачи показан на рис. 4. Исходными данными для расчета являются - угол наклона обрабатываемой поверхности  $\alpha^\circ$ , радиус режущей части фрезы  $r_6$  или  $r_{cf}$  и требуемые параметры качества поверхности  $Rz$  или  $Ra$ , сопоставимые с высотой «гребешка» в пропорциях указанных выше (блок 1). В блоке принятия решений 2 в зависимости вида исходной информации о высоте неровности определяется дальнейший порядок расчета. При значении высо-

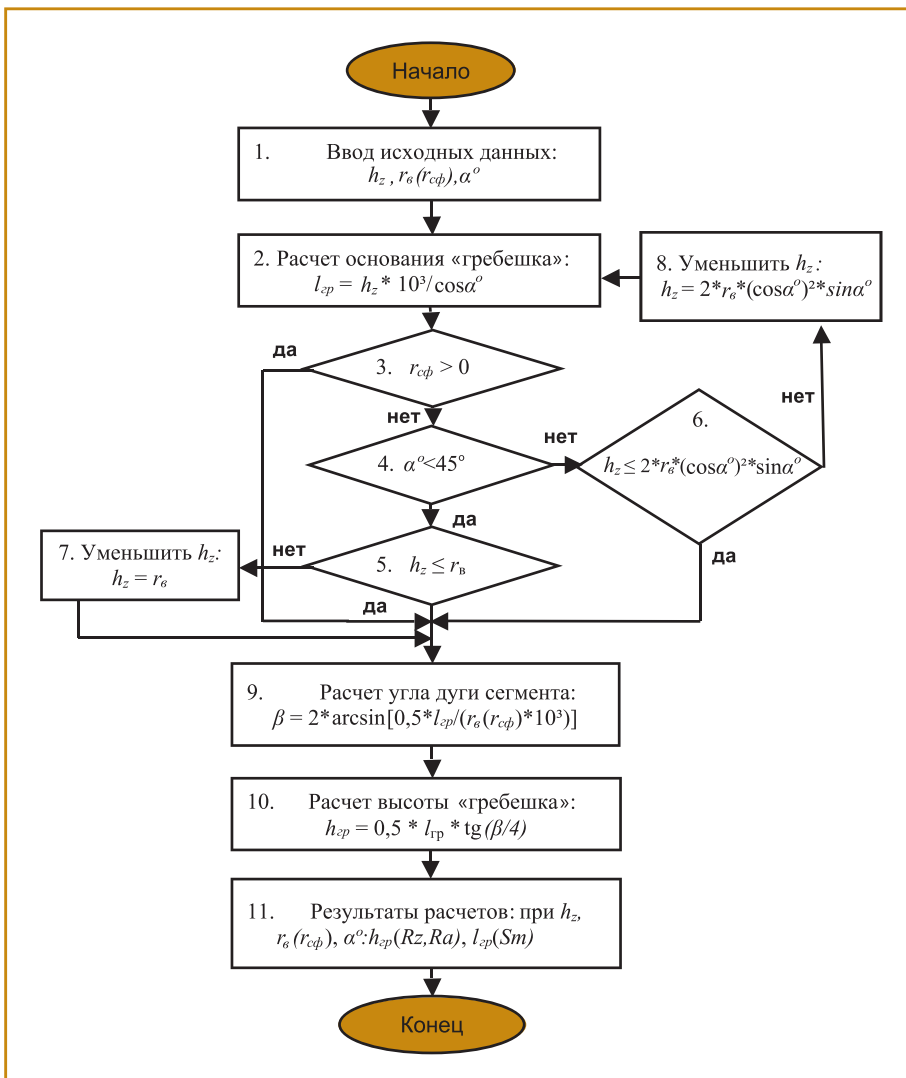


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета параметров «гребешка» в зависимости от заданной величины перемещения по оси Z

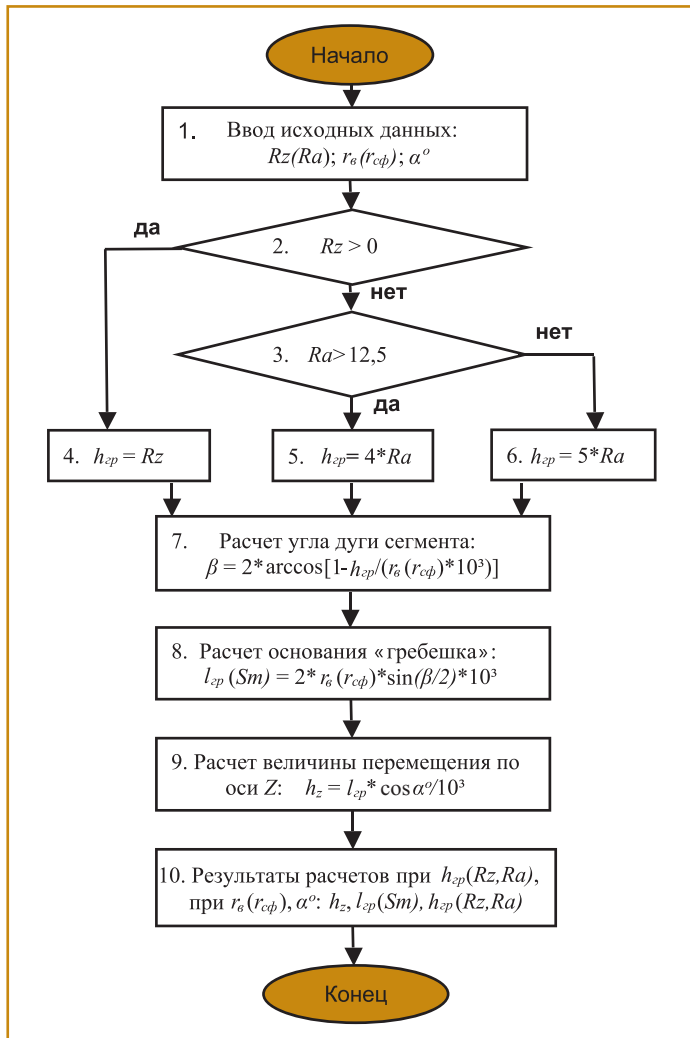


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета величины перемещения по оси Z в зависимости от заданных параметров качества поверхности

ты неровности, обозначенной через  $Rz$ , расчет продолжается через блок 4. Если параметры неровностей обозначены через  $Ra$ , то расчет для величины  $Ra > 12,5$  мкм выполняется через блок 5, а для величины  $Ra < 12,5$  мкм - через блок 6. Дальнейшее вычисление условий фрезерования, обеспечивающих заданное качество поверхности, выполняется в блоках 7-9. В блоке 7 определяется угол дуги сегмента окружности с радиусом режущей части фрезы, равной известной высоте «гребешка». В блоке 8 производится расчет длины основания «гребешка». В блоке 9 на основании ранее выполненных расчетов определяется требуемое значение величины перемещения по оси Z, обеспечивающее заданную чертежом шероховатость поверхности. В блоке 10 формируются результаты расчета - величина перемещения по оси Z и получаемые параметры шероховатости поверхности после фрезерования.

Представленные алгоритмы апробированы на конкретных данных. Результаты расчетов (рис. 5), позволяют сделать предварительный прогноз о па-

раметрах «гребешка» при 2,5-координатном фрезеровании фрезой с НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине режущей кромки в указанных условиях:  $\alpha^\circ = 15^\circ$ ;  $r_\phi = 0,120; 0,200; 0,300$  мм. На графике стрелками показано, что при величине  $h_z = 0,09$  мм при фрезеровании фрезой с НТП с радиусом при вершине режущей кромки  $r_\phi = 0,120$  мм высота «гребешка»  $h_{сп} = 10$  мкм.

Анализ влияния величины перемещения по оси Z на высотные параметры «гребешка» для фрез с радиусной или сферической формами режущей кромки приведен на рис.6. Графики построены для значений:  $\alpha^\circ = 15^\circ$ ;  $r_{сф} = 4, 5$  и 6 мм. На рис. 6 стрелками показано, что для получения высоты «гребешка»  $h_{сп} = 20$  мкм, величина перемещения по оси Z -  $h_z = 0,75$  мм при угле наклона обрабатываемой поверхности  $\alpha^\circ = 15^\circ$  и радиусе режущей кромки фрезы  $r_{сф}$ .

#### Метод проектирования операций 2,5-координатного фрезерования объемных поверхностей

Для программирования 2,5-координатного фрезерования в модуле САМ системы АЕМ реализуется несколько схем обработки [1, 4]. В управляющей программе для обработки объемной модели, геометрические параметры «гребешка» определяются задаваемой величиной шага по оси Z, а также радиусом при вершине режущей пластины и углом наклона обрабатываемой поверхности. Величина шага по оси Z, в зависимости от требований к поверхности, рассчитывается по разработанным зависимостям. Шаг задается программированием многопроходной обработки по оси Z, которая заносится в диалоговое окно модуля САМ.

В качестве рекомендаций для специалистов разработан метод проектирования операций 2,5-координатного фрезерования объемной поверхности на станке с ЧПУ для плоской обработки, которая реализуется в следующем порядке.

1. Анализ технологичности деталей с учетом возможности 2,5-координатного фрезерования объемной поверхности на станке с ЧПУ для плоского фрезерования.

2. Определение возможности обеспечения качества поверхности при 2,5-координатном фрезеровании на станке с ЧПУ для плоского фрезерования и расчет величины перемещения по оси Z в зависимости от заданных чертежом параметров шероховатости поверхности детали по приведенным алгоритмам (рис. 3, 4) и занесение этих данных в диалоговое окно САМ-системы.

3. Определение экономичности применения 2,5-координатного фрезерования объемной поверхности на станке с ЧПУ для плоского фрезерования [7].

4. Разработка плана 2,5-координатного фрезерования объемной поверхности на станках с ЧПУ для плоского фрезерования.

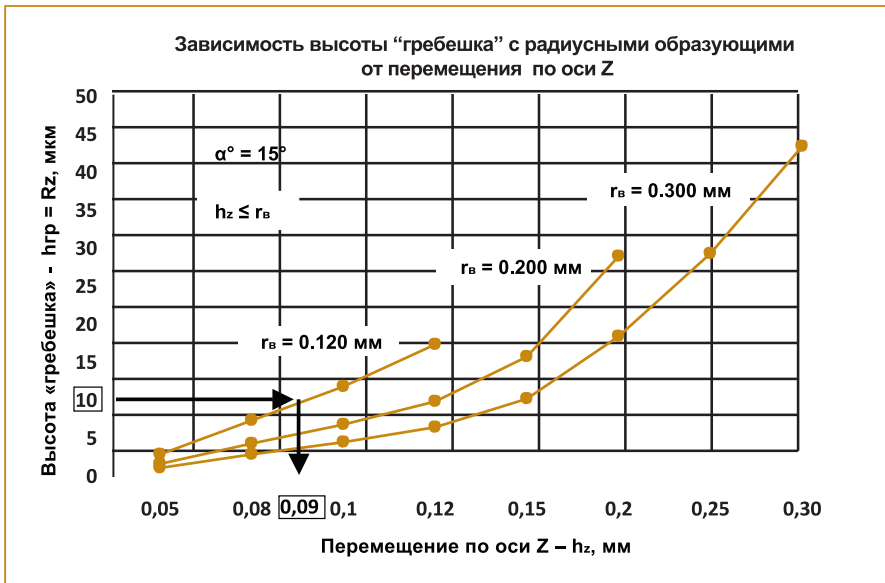


Рис.5. Зависимости высоты «гребешка» от условий 2,5-координатного фрезерования фрезами с НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине:  $\alpha = 15^\circ$ ;  $r_v = 0,12; 0,2; 0,3$  мм

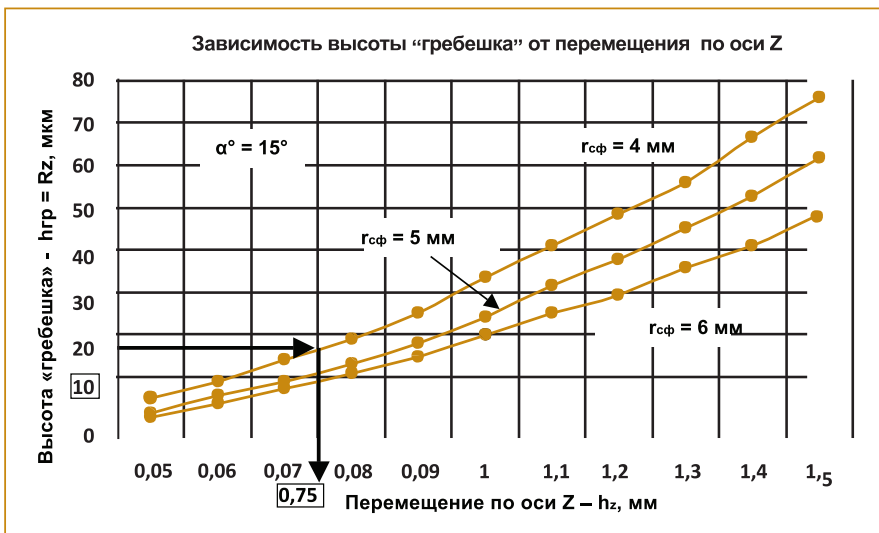


Рис.6. Зависимости высоты «гребешка» от условий 2,5-координатного фрезерования фрезами с радиусными или сферическими формами режущей части:  $\alpha = 15^\circ$ ;  $r_{сф} = 4,0; 5,0$  и  $6,0$  мм

5. Разработка с применением САD-системы электронной модели изделия и элементов технологической системы, необходимых для создания управляющей программы для станка с ЧПУ.

6. Формирование и внесение в САМ-систему исходной информации (системы координат, нулевые точки детали и режущего инструмента, рабочие плоскости, плоскости интерполяции, таблицы коррекции инструментов, защищенные зоны станка) [1].

7. Выбор в модулях САМ и САPP режущего инструмента и расчет режимов фрезерования [8].

8. Программирование в САМ-системе технологических и вспомогательных переходов операции фрезерования на станке с ЧПУ [3].

9. Верификация управляющей программы и моделирование процесса обработки.

10. Адаптация управляющей программы с помощью постпроцессора к конкретному станку с ЧПУ.

11. Оформление технологической документации на разработанную фрезерную операцию с применением модулей САD и САPP [8].

**Заключение**

В процессе проведенных исследований получены следующие результаты:

- определена возможность фрезерования объемных поверхностей 2,5-координатным фрезерованием на станках с ЧПУ для плоского фрезерования при создании соответствующей управляющей программы в САМ-системе;
- предложены геометрические параметры описания «гребешка» на объемных поверхностях после фрезерования;
- выявлены условия фрезерования и их влияние на геометрические параметры «гребешка»;
- разработан математический аппарат расчета геометрических параметров «гребешка» в зависимости от условий фрезерования и формы объемного изделия, подготовлены алгоритмы для автоматизации расчетов;
- выполнена проверка адекватности предложенных теоретических разработок компьютерным плоским и объемным моделированием;

- в помощь технологу-программисту предложена поэтапная методология проектирования операций 2,5-координатного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоского фрезерования с применением разработанных математических расчетов.

По результатам проведенных исследований сформулированы следующие выводы.

1. Подготовка управляющих программ в САМ-системе обеспечивает 2,5-координатное фрезерование объемных моделей на станках с ЧПУ для плоского фрезерования.

2. Предложенные математические формулы отражают процесс формирования параметров «гребеш-

ка» в зависимости от условий фрезерования, формы объемного изделия, профиля режущей части фрезы. Разработанные алгоритмы позволяют прогнозировать состояние обрабатываемой поверхности после 2,5-координатного фрезерования и выполнять подбор условий для получения заданных геометрических параметров «гребешка».

3. Предложенная поэтапная методология разработки операций 2,5-координатного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоского фрезерования позволяет обеспечить подготовку соответствующих специалистов и систематизировать проектную деятельность технолога-программиста.

4. Применение на производстве предложенных разработок позволяет сократить расходы на фрезерование объемных поверхностей при 2,5-координатном фрезеровании на станках с ЧПУ для плоского фрезерования.

#### Список литературы

- Казаков А.А. 2.5 координатное фрезерование в системе ADEM // САПР и графика. 2002. №6. С. 29-34
- Шачнев С., Рожанович Г., Ремизов М., Евсеев С. Опыт применения САПР ADEM в производстве ракетно-космической техники // САПР и графика. 2005. № 2. С. 1.

Аверченков А.В., Колошкина И.Е., Шентунов С.А. Научно-технологическая обработка заготовок на станках с ЧПУ и программирование в САМ-системе // Научно-технологическая в машиностроении. 2019. №4 (94). С. 31-39.

САМ. Плоское фрезерование 2х-2.5х. <https://adem.ru/products/cam>

Кузьмин Ю.П., Помпеев К.П., Целищев А.А. Использование фрезерного станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 4. С. 273-277.

Сергеев А.С., Плотников А.Л., Добрынин Ф.Г. Обеспечение качества металлообработки сборным многолезвийным твердосплавным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ // Тр. междунар. научно-практич. конф. «Перспективное развитие науки, техники и технологий». 2011. С. 212-215.

Аверченков А.В., Колошкина И.Е., Шентунов С.А. Автоматизация нормирования операций производства изделий на оборудовании с ЧПУ // Вестник ИГЭУ. 2020. Вып. 6. С. 57-67.

Колошкина И.Е. Методика автоматизированной разработки технологической документации в системе CAD/CAM/CAPP // Автоматизация в промышленности. 2019. №9. С. 32-34.

**Колошкина Инна Евгеньевна** - руководитель проектов Федерального центра компетенций в сфере производительности труда, аспирант Брянского государственного технического университета.  
Контактный телефон 8(953)271-19-21.  
E-mail: [inna.koloshkina@yandex.ru](mailto:inna.koloshkina@yandex.ru)

#### Почему управление энергопотреблением имеет ключевое значение для успеха 5G

Развитие технологий 5G откроет целый ряд новых возможностей для телекоммуникационных компаний. Так, новое поколение связи обеспечит им дальнейшее устойчивое развитие, а также поможет повысить энергоэффективность. Однако совместное исследование консалтинговой компании STL Partners и Vertiv показало обратное. На практике операторы связи будут часто сталкиваться с трудностями при попытке энергоуправления 5G сетями.

По оценкам экспертов, 5G сети до 90% энергоэффективнее, чем сети 4G. Тем не менее затраты компаний на электроэнергию вырастут в несколько раз, так как инновационным сетям необходимо гораздо больше энергии из-за повышенной плотности сетевого трафика и сильной нагрузки на сеть. Операторы связи могут решить эту проблему двумя способами: использовать передовые подходы для достижения энергоэффективности в инфраструктурах или стимулировать клиентов к внедрению аналогичных сервисов.

Согласно данным STL Partners, глобальный трафик 5G значительно превысит 3G/4G уже в 2025 г., что делает устойчивость сети первостепенной задачей для операторов связи. В то же время 40% опрошенных компаний указали, что при внедрении 5G сетей основным приоритетом должно стать обеспечение энергоэффективности.

В отчете Why Energy Management Is Critical To 5G Success (Почему управление энергопотреблением имеет ключевое значение для успеха 5G) представлены результаты нескольких исследований, включая опрос 500 компаний по всему миру. Отчет отражает проблемы, с которыми сталкиваются телекоммуникационные компании, стараясь сдерживать рост энергопотребления и других затрат, связанных с 5G.

В документе содержатся несколько передовых методов по решению основных проблем.

1. Сетевые технологии: внедрение аппаратного и программного обеспечения, разработанного для повышения энергоэффективности.
2. Инфраструктура объектов, включающая новые периферийные центры обработки данных, поддерживающие облачные технологии.
3. Управление инфраструктурой: внедрение необходимого оборудования и программного обеспечения для измерения, мониторинга, оптимизации и автоматизации сети, а также для ее управления.
4. Организация и оценка: целостное представление о затратах и инвестициях в масштабах всей сети.
5. Сотрудничество: использование инновационных и нетрадиционных коммерческих моделей, стандартов и вариантов сотрудничества с клиентами.

В исследовании также выделены три отрасли, которым сети 5G принесут наибольшую пользу. Так, к 2030 г. промышленный сектор может получить прибыль до 730 млрд. долл. США благодаря использованию 5G для расширенного профилактического обслуживания и автоматизации. Похожая картина ожидается в индустриях транспорта и логистики, доходы которых вырастут на 280 млрд. долл. США в результате внедрения транспортной инфраструктуры и сервисов автоматизированной доставки товаров на дом. И, наконец, в отчете говорится, что 5G может помочь сектору здравоохранения, предоставив расширенный доступ к медицинским услугам для 1 млрд. пациентов к 2030 г.

<https://www.vertiv.com/ru-emea/>