

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ УПОРНЫХ РЕЗЬБ

И.А. Щуров¹, shchurovia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6354>

А.В. Щурова¹, shchurovaav@susu.ru

Е.В. Немытова², thage@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Альтаир плюс», Челябинск, Россия

Аннотация. Резьбофрезерование на станках с ЧПУ получило широкое практическое применение как высокопроизводительный метод обработки. В случае применения трехкоординатных станков с ЧПУ, когда оси нарезаемой резьбы и фрезы параллельны, эта особенность не препятствует получению метрических резьб. Однако при нарезании резьб с упорным профилем, у которых угол наклона одной из боковых сторон может составлять всего несколько градусов, такая обработка зачастую становится невозможной. Причиной этого является явление огибания исходной инструментальной поверхностью, в данном случае – поверхностью вращения номинальной поверхности детали, здесь – винтовой поверхности. Следствием такого огибания является возможное подрезание резьбы или образование на ней необработанных участков. Существует множество методик профилирования подобных фрез, однако все они достаточно сложны, связаны с трансцендентными и тригонометрическими уравнениями, что требует применения соответствующих компьютерных программ. В связи с этим инженерам-технологам производственных предприятий необходима практическая простая методика, которая позволяет на первых этапах проектных работ оценить возможность такой обработки и при необходимости выбрать начальные параметры требуемого инструмента. На основании аналитического подхода получено простое неравенство, которое может быть реализовано с использованием типовых офисных программ и может служить основой для указанного выбора. В случае обработки резьб с большим шагом, когда явление огибания существенно влияет на получаемый профиль резьбы детали, методика позволяет спрофилировать и далее подточить резьбовую фрезу для минимизации погрешностей получаемой поверхности упорной резьбы.

Ключевые слова: упорная резьба, резьбофрезерование, профилирование инструмента, станок с ЧПУ

Для цитирования: Щуров И.А., Щурова А.В., Немытова Е.В. Инженерная методика определения возможности фрезерования внутренних упорных резьб // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 4. С. 39–48. DOI: 10.14529/engin250404

ENGINEERING METHOD FOR DETERMINING THE POSSIBILITY OF INTERNAL BUTTRESS THREAD MILLING

I.A. Shchurov¹, shchurovia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6354>
A.V. Shchurova¹, shchurovaav@susu.ru
E.V. Nemitova², thage@mail.ru.

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² PC "Altair plus", Chelyabinsk, Russia

Abstract. Thread milling on CNC machines is widely used in practice as a highly productive method of machining. In the case of using three-coordinate CNC machines, when the axes of the thread being cut and the milling cutter are parallel, this feature does not prevent obtaining metric threads. However, when cutting threads with a buttress profile, in which the angle of inclination of one of the lateral sides is just a few degrees, such machining often becomes impossible. The reason for this is the phenomenon of enveloped path of the original tool surface generation, in this case – the surface of revolution, the nominal surface of the part, here the screw surface. The consequence of such enveloping is possible undercutting of the thread or the formation of unmachined areas on it. There are many methods for profiling such cutters, but all of them are quite complex, associated with transcendental and trigonometric equations, which requires the use of appropriate computer programs. In this regard, engineers of manufacturing enterprises need a simple practical method that gives the opportunity to evaluate the possibility of such processing at the first stages of design work and, if necessary, select the initial parameters of the required tool. Based on the analytical approach, a simple inequality has been obtained that can be implemented using typical office programs and can serve as a basis for the specified choice. In the case of cutting threads with a large pitch, when the phenomenon of enveloping significantly affects the resulting thread profile of the part, the method enables profiling and then sharpening the milling cutter to minimize errors in the resulting surface of the buttress thread.

Keywords: buttress thread, thread milling, tool profiling, CNC machine

For citation: Shchurov I.A., Shchurova A.V., Nemitova E.V. Engineering method for determining the possibility of internal buttress thread milling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025:25(4):39–48. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250404

Введение

Ряд деталей машиностроения имеет в своем составе резьбовые поверхности с упорным профилем. Такой профиль определяется стандартами, среди которых: ГОСТ 10177-82 «Резьба упорная», ГОСТ 13535-87 «Резьба упорная усиленная 45°», ГОСТ 34057-2017 «Соединения резьбовые обсадных, насосно-компрессорных труб, труб для трубопроводов и резьбовые калибры для них», ANSI B1.9 “Buttress inch screw threads”, DIN 513-1 “Metric buttress threads”. Угол наклона одной из боковых сторон таких резьб может составлять 7° и даже 3°. Нарезание внутренних упорных резьб часто производится специальными метчиками [1], стоимость которых существенно выше стандартных метчиков для метрических резьб. Одним из экономичных способов получения резьб является фрезерование на станках с ЧПУ. Ранее в промышленности широко применялись цельные, составные или насадные резьбовые гребенчатые фрезы по ГОСТ 1336-77. В настоящее время для внутренних резьб стали широко применяться и сборные фрезы [2]. Например, в каталоге от компании Vagrus приведены фрезы для упорных резьб диаметром от 22 мм [2]. В то же время для метрических и дюймовых 55° резьб рекомендуются фрезы для диаметров от 3 мм. Одной из причин ограниченного применения такого фрезерования для упорных резьб является влияние явления огибания, которое приводит к подрезанию поверхности детали или появлению на ней необработанных участков [3–5]. Если для некоторых стандартных резьб в каталогах инструментальных компаний существуют рекомендации по выбору фрез, то в общем случае, особенно в случаях получения специальных резьб [1], инженеру-технологу необходимо самостоятельно

выбрать фрезу, основываясь на собственном производственном опыте. Таким образом, необходима инженерная методика расчета, которая позволила бы простыми вычислениями, например, с использованием типовых офисных программ, определиться с возможностью применения имеющихся фрез в каждом конкретном случае. В связи с этим возникает необходимость анализа научной литературы для поиска имеющихся решений.

1. Анализ литературы, цель исследования, актуальность, методологические вопросы.

Вопросы обработки винтовых поверхностей дисковыми инструментами являются общими для многих производственных случаев, хорошо проработаны в прошлом столетии и подробно отражены в научной и учебной литературе [3–5]. Подробные фундаментальные работы публикуются и в последние десятилетия [6]. В этих работах отражены методики решения прямой (расчет профиля инструмента для заданной винтовой поверхности) и обратной – проверочной задач (расчет профиля детали для заданного инструмента). Вместе с тем подобные методики являются достаточно сложными для практического применения, что определяется наличием в них трансцендентных уравнений и тригонометрических функций. Так, наличие тригонометрических функций приводит к появлению действительных и мнимых корней уравнений. В последнем случае математически решение является верным, однако такое решение не соответствует фактическому расположению в пространстве, например, точек линии контакта исходной инструментальной поверхности (ИИП) и номинальной поверхности детали (НПД) [3, 4]. В связи с этим в каждом случае приходится «вручную» выбирать действительные точки среди множества действительных и мнимых точек. Такие же трудности встречаются и при решении трансцендентных уравнений с тригонометрическими функциями. Все это, как было отмечено выше, затрудняет практическое использование данных методик.

Подобные решения встречаются не только в книжных изданиях, но и в отдельных статьях, например, в работе S.K. Kang и др. [7, 8]. Направленность данной работы, как отмечается в ее названии и аннотации, связана с применением САД-систем, что характеризует ее практическую направленность. Однако в статье приведены зависимости с частными производными, в том числе дана и такая последняя зависимость, что вызывает сомнение в применении такой методики на практике инженерами-технологами. Кроме того, практические результаты данного подхода в САД-системах в данной статье, состоящей из двух частей, так и не показаны. Одним из достоинств данной публикации является оценка степени влияния различных параметров технологической системы на погрешности получаемого профиля детали. Подобное исследование приведено в другой аналогичной статье [9]. В этой статье указывается, что параметры установки инструмента относительно заготовки имеют решающее значение, что подтверждает специфичность данного процесса обработки как процесса с эффектом огибания дискового инструмента вдоль винтовой поверхности. Попытка связать с САД-системой расчет профиля детали и профиля инструмента дана в статье С.С. Chiang и др. [10]. Особенностью данной статьи является замена трехмерной расчетной схемы на двухмерную. Кроме того, применено численное моделирование с использованием булевой алгебры, что позволяет дать устойчивые решения. Между тем следует отметить, что устойчивость решения зачастую связана с невыполнением условий правильного формообразования, в том числе наличием исходной инструментальной поверхности для заданной схемы обработки и заданной поверхности детали [4]. Таким образом, вопрос получения резьбы заданного профиля с заданной точностью и здесь остается открытым. Этот вопрос более подробно рассмотрен в другой работе С.С. Chiang [11]. В данной работе показано, что оставшиеся необработанные или подрезанные участки резьбы с прямоугольным профилем – типичное явление. Авторы предлагают использовать рассчитанный по их методике угол скрещивания осей инструмента и образуемой резьбы. Такой прием, очевидно, является оправданным в случае обработки наружных резьб, что и показано в данной статье. В случае обработки внутренних резьб наклон инструмента, как правило, невозможен, особенно при получении глубоких резьб и в условиях близких по размерам диаметров инструмента и нарезаемой резьбы, что характерно для резьб малого диаметра. Аналогичные исследования приведены в работе G. Fromentin и др. [12]. Здесь были приведены зависимости общего вида и алгоритмы, которые показывают, что решение является сложным и требует итерационного подхода. Практическое применение материалов данной статьи рядовыми инженерами-технологами вызывает сомнение.

Несмотря на возможность использования фрезерования внутренних резьб на пятикоорди-

натных станках с ЧПУ, вопросы точности обработки, связанные с оценкой получаемого профиля детали, остаются в центре внимания многих исследователей [13–17]. В работе J. Jia дана методика оценки погрешности резьбового профиля в разных сечениях для трех- и пятикоординатной обработки [13]. В методике используются аналитические зависимости, расчет облаков точек резьбы и САД-моделирование. В выводах авторы отмечают сложность принятия решения и предлагают заинтересованным исследователям обратиться к этим авторам с персональным запросом. Результаты подобных исследований приведены и в работах отечественных ученых, например, в работах, выполненных под руководством О.В. Малькова [14–16]. Обработку упорных резьб предлагается ввести со скрещивающимися осями, при этом также дается оценка отклонений получаемого и исходного профиля резьбы детали. Общая методика профилирования инструмента, включающая профилирование для случая упорных, круглых резьб, цилиндрических и конических резьб, приведена в другой опубликованной работе [15]. Результаты экспериментальных исследований приведены в третьей работе данных авторов [16]. Все эти работы подтверждают сложности с обеспечением требуемого профиля упорной резьбы для инженеров-технологов, которым поставлена задача получения такой резьбы резьбофрезерованием. Аналогичная работа, связанная с использованием скрещивающихся осей инструмента и резьбы детали, опубликована и зарубежными исследователями [17]. В работе предлагается использовать сложное дополнительное устройство. Все эти публикации подтверждают отсутствие простого решения для инженеров предприятий в принятии решения о возможности выбора готового инструмента для получения требуемой резьбы детали на начальной стадии проектных работ.

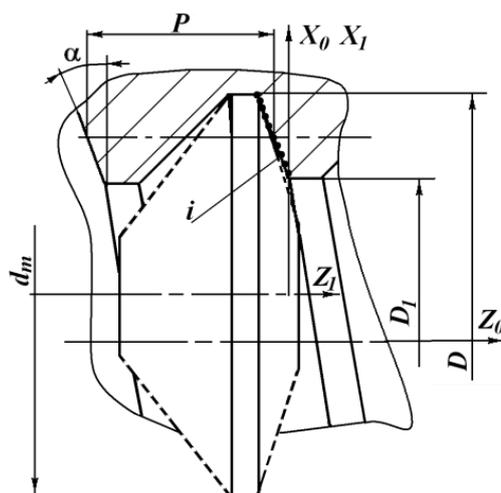
Несмотря на возможности применения пятикоординатных станков с ЧПУ и дополнительных устройств для получения упорных резьб, в общем случае целесообразность применения трехкоординатных станков остается актуальной, что было отмечено нами выше. Кроме того, такая необходимость связана, например, и с применением многозубых пластин резьбовых фрез [18].

В контексте инженерной методики расчета особую группу исследований составляют исследования с применением САД-систем. Такая оценка подрезания и необработанных участков резьбы была отражена в статье А.С. Ямникова и др. [19]. Исследовалось ее применение для трубной резьбы с углом профиля 55° . Показано, что итоговая имитационная методика требует итерационного решения. Другим решением для определения профиля фрезы под заданную резьбу является работа S.W. Lee и др. [20]. Авторы предлагают использовать трехмерную модель фрезы и путем ее перемещения по винтовой линии резьбы получать поверхность этой резьбы и затем осевое сечение детали. На основе оценки отклонения получаемого профиля от требуемого профиль инструмента итерационно корректируется до получения приемлемых результатов. По существу система является системой на основе САМ-систем и рекомендуется для служб технологической подготовки производства. Вместе с тем, как и предыдущие методики, она сложна для принятия начального решения о применимости выбранной фрезы из-за наличия сложных уравнений, которые необходимо связать с какой-либо коммерческой САМ-системой. В рамках подобных задач проводились исследования и авторов данной статьи [21]. На основе решения обратной инструментальной задачи были получены данные о применимости типовых фрез для получения стандартных упорных резьб. Однако и эта методика не может быть признана как средство начального решения при выборе инструмента и параметров его установки.

Таким образом, **целью данного исследования** является разработка методики принятия начального решения о применимости выбранной резьбовой фрезы для получения резьбы упорного профиля на трехкоординатном станке с ЧПУ. **Актуальность** предлагаемого исследования связана с практической необходимостью инженеров-технологов промышленных предприятий оснастить инструментами операции резьбофрезерования на трехкоординатных станках с ЧПУ, при этом избежать грубых ошибок, связанных с подрезанием профиля резьбы или получением необработанных ее участков. В качестве **гипотезы** принято использование принципа о необходимости существования исходной инструментальной поверхности для заданной схемы обработки и заданной поверхности детали. **Методология исследования.** Для решения поставленной задачи предлагается использовать общепринятый метод расчета на основе аналитической геометрии и векторной алгебры с получением уравнения характеристики. Невозможность получения результатов в этом уравнении, необходимым для расчета точек исходной инструментальной поверхности, предлагается считать критерием отбора инструмента. **Структура работы.** Первоначально

даются расчетные зависимости и описание методики расчета для случая трехкоординатного фрезерования упорной резьбы. Далее приводятся конкретные примеры применения данной методики и формулируются соответствующие выводы.

2. Методика отбора инструмента для заданной схемы формообразования и заданной резьбовой поверхности детали. Как было отмечено выше, методика основана на общеизвестных подходах [4]. Расчетная схема с указанием параметров фрезы и резьбовой поверхности приведена на рисунке. Среди таких параметров используются: D и D_1 – наружный и внутренний диаметры внутренней резьбы; P – шаг резьбы; α – угол наклона бокового профиля резьбы; d_m – наружный диаметр фрезы.



Расчетная схема с параметрами фрезы и резьбовой поверхности
Calculation scheme with parameters of the milling cutter and thread surface

Для расчета выберем систему координат X_0, Y_0, Z_0 , связанную с резьбой детали, и систему X_1, Y_1, Z_1 , связанную с фрезой. По условиям трехкоординатной обработки их оси Z_0 и Z_1 параллельны и удалены друг от друга на межосевое расстояние A . Поскольку профиль резьбы детали известен, то его, например, правая (упорная) сторона описывается уравнением прямой линии

$$z_0 = x_0 / \tan(\alpha). \quad (1)$$

Тогда уравнения винтовой поверхности резьбы [4]:

$$x_0 = z_0 \tan(\alpha) \cos(\delta), \quad y_0 = z_0 \tan(\alpha) \sin(\delta), \quad z_0 = z_0^* + p\delta, \quad (2)$$

где δ – угол, характеризующий положение радиус-вектора текущей точки на поверхности резьбы; z_0^* – некоторое начальное значение аппликаты для построения профиля боковой линии резьбы; p – винтовой параметр резьбы: $p = P/2\pi$.

Уравнения взаимосвязи систем координат ИИП и НПД в начальный момент времени обработки:

$$x_1 = x_0 - A, \quad y_1 = y_0, \quad z_1 = z_0. \quad (3)$$

Для определения уравнения характеристики необходимо найти уравнение вектора нормали к НПД:

$$\vec{N} = \vec{B} \times \vec{C}, \quad \vec{B} = \partial \vec{r} / \partial z_0, \quad \vec{C} = \partial \vec{r} / \partial \delta,$$

или после подстановки:

$$\vec{N} = \vec{i} (p \tan(\alpha) \sin(\delta) - z_0 \tan(\alpha) \cos(\delta)) - \vec{j} (p \tan(\alpha) \cos(\delta) + z_0 \tan(\alpha) \sin(\delta)) + \vec{k} (z_0 \tan^2(\alpha)), \quad (4)$$

где \vec{r} – радиус-вектор текущей точки винтовой поверхности, определяемый координатами (2).

Согласно принятой методике, необходимо найти уравнение вектора движения НПД вокруг оси ИИП:

$$\vec{V} = \vec{\omega} \times \vec{\rho}, \quad \vec{\omega} = \vec{k} \quad \text{и} \quad \vec{\rho} = \vec{r} - \vec{A},$$

или после подстановки:

$$\vec{V} = \vec{i}(-z_0 \tan(\alpha) \sin(\delta)) + j(z_0 \tan(\alpha) \cos(\delta) - A), \quad (5)$$

где $\vec{\omega}$ – вектор вращательного движения вокруг оси z_0 (z_1); \vec{r} – радиус-вектор текущей точки винтовой поверхности от оси вращения – оси фрезы.

Тогда уравнение характеристики для данного случая обработки с параллельными осями инструмента и резьбы имеет простой вид:

$$\vec{N}\vec{V} = 0 \text{ или } (1/z_0)\cos(\delta) + (1/p)\sin(\delta) + (-\tan(\alpha)/A) = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение можно решить следующим способом:

$$\delta_1 = \arccos\left[(-z_0 \tan(\alpha)/A)\cos(\arctan(z_0/p))\right]$$

$$\text{и } \delta_2 = \arccos\left[(-z_0 \tan(\alpha)/A)\cos(\arctan(z_0/p)) + \pi\right], \quad (7)$$

где индексы при δ и соответствующие им зависимости отражают факт периодичности тригонометрических функций и наличие в связи с этим действительных и мнимых корней уравнения характеристики.

Очевидно, что решения уравнений (7) существуют тогда и только тогда, когда значение аргумента функции арккосинуса в квадратных скобках по модулю будет менее или равно единице. Именно эти неравенства и принято использовать как основной критерий возможности получения упорной резьбы данным методом обработки; это первый критерий – критерий существования ИИП:

$$\left|(-x_0/A)\cos(\arctan(x_0/p \tan(\alpha)))\right| \leq 1 \vee \left|(-x_0/A)\cos(\arctan(x_0/p \tan(\alpha)) + \pi)\right| \leq 1. \quad (8)$$

Данный критерий (8) должен выполняться для всех точек заданного бокового профиля резьбы. Поскольку такие точки расположены от внутреннего до наружного диаметров резьбы, то необходимо определиться с точками, которые являются критическими в данном случае. Как отмечается в существующих руководствах для инженеров, например, в руководстве от Sandvik Coromant, большая точность профиля резьбы при ее фрезеровании достигается меньшими диаметрами инструмента: “To minimize the profile deviation, the cutter diameter should be no greater than 70 % of the threading diameter” [22]. На прилагаемом в руководстве рисунке показано, что максимальные отклонения возникают на наружном диаметре внутренней резьбы. В качестве примера приводятся следующие сведения для случая резьбы М30х3: для диаметра фрезы 21,7 мм отклонения профилей получаемой и исходной резьбы составляет 0,07 мм, а для диаметра фрезы 11,7 мм такие отклонения составляют всего 0,01 мм. Другие из отмеченных нами выше исследований отражают такие же выводы. Таким образом, в качестве критериальной точки проверки неравенства будут использоваться точки на наружном диаметре резьбы. Следовательно, в уравнении (1) должно быть принято $x_0 = D/2$, что и предлагается использовать в условии (8).

Приведенные уравнения могут быть далее дополнены уравнениями по известной методике [4], включающими в себя уравнения преобразования систем координат детали при ее вращении относительно оси инструмента, определение координат профиля ИИП из условия равенства координат абсциссы нулю (определяются углы такого поворота, при которых точки контакта лежат в осевой плоскости инструмента $y_1 = 0$). Таким образом, можно рассчитать координаты точек осевого профиля ИИП и сравнить, насколько они отклоняются от прямой линии. Эти уравнения в данной статье не приводятся, но они используются в следующем разделе.

3. Применение методики отбора параметров фрезы для случая фрезерования упорной резьбы. Полученный критерий отбора был использован для его демонстрации на отдельных конкретных примерах, что позволяет выявить его некоторые особенности. Поскольку методика заявлена как инженерная для технологов промышленных предприятий, то все расчеты были выполнены в общедоступной офисной программе – в MS Excel. В качестве примера первоначально был использован случай получения резьбы S24·3 ГОСТ 10177-82. Угол левого профиля у этой резьбы равен 30°, как и у метрических резьб. Высота профиля по стандарту равна $0,75P = 2,25$ мм. Как показали расчеты, левая часть условия (8) выполняется для всех точек данного профиля резьбы. Построенный в MS Excel профиль фрезы был аппроксимирован средствами этой программы полиномом второго порядка. Полученное уравнение имеет вид: $0,0086z^2 + 1,5446z + 2,2576$, что по его линейному члену соответствует углу профиля фрезы 32,9°. Степень влияния параболической

составляющей полинома составляет менее 1 %, что можно отнести к погрешностям аппроксимации. Аналогичный расчет, выполненный для угла наклона боковой стороны 3° , показал, что условие (8) во всех точках профиля не выполняется, следовательно, правильная обработка не представляется возможной. Лишь уменьшение диаметра фрезы до 4 мм показывает возможность получения математического решения, однако практически такую фрезу применить невозможно и, следовательно, трехкоординатная обработка таких резьб принципиально не представляется возможной.

Поскольку в каталоге от компании Vargus [2] даются фрезы для получения резьб от $0,875''$ с шагом от $25,399/16 = 1,587$ мм, то далее выполним оценку применимости рекомендуемой в каталоге конкретной фрезы с номером TM2SC16W14-35-5L-ABUT и с пластиной типа 5.0L (Mini-L) – 5LI16ABUT-TM для нарезания резьбы с углом наклона боковой стороны профиля 7° (ASME B1.9–1973). Расчеты показали, что для указанной резьбы во всех ее точках обеспечивается выполнение условия (8), однако построенный по рассчитанным точкам полином $0,05932z^2 + 4,8636z + 3,9228$ по его линейному члену показывает, что угол профиля ИИП фрезы должен быть равным $11,6^\circ$. Это намного выше указанных на резьбе 7° . Кроме того, параболическая составляющая полинома составляет более 10 % от линейного члена, что говорит о большем, чем в предыдущем случае, изгибе резьбы. Однако на почти вертикальной линии профиля резьбы такой изгиб фактически не проявляется.

Дальнейшее исследование данной методики может быть проиллюстрировано фрезерованием новой нестандартной резьбы с ее особыми условиями. В качестве примера выберем резьбу предыдущего случая, но с углом наклона боковой стороны профиля 3° . Предполагается, что можно использовать фрезу с такими же размерами, как и в предыдущем случае. Выполненные расчеты показали, что для всех точек условие (8) не выполняется. Таким образом, применение данной фрезы с новой пластинкой невозможно. При уменьшении диаметра фрезы до 12 мм условие (8) снова выполняется для всех точек профиля. Тот же полином второго порядка имеет в некотором смысле парадоксальный вид: $8,5727z^2 - 12,343z + 7,6684$. Знак при линейном члене отрицательный, что компенсируется параболическим членом с практически таким же по величине коэффициентом, что и у линейного члена. Сам график профиля фрезы практически не отличается от прямой линии, что обусловлено малыми вариациями величины z_0 от $7,875$ мм до $8,977$ мм, то есть в пределах 1,2 мм. Применение в MS Excel в качестве аппроксимирующей функции полинома первой степени дает выражение $13,336z - 11,555$, что показывает угол наклона данной линии в $4,2^\circ$.

Поскольку больший диаметр инструмента всегда предпочтителен с точки зрения производительности и жесткости, то целесообразна попытка увеличить диаметр фрезы, например, до 13,2 мм. Расчеты показывают, что условие (8) в этом случае выполняется только для первых 9 точек из выбранных в качестве примера 11 точек. Для точки с номером 11 на наружном диаметре резьбы и предыдущей 10-й точки условие (8) не выполняется, что подтверждает ранее выдвинутую гипотезу о достаточности проверки условия только по последней точке – точке на наружном диаметре внутренней резьбы. В производственных условиях в связи с требованием экономии времени на проектные работы данный факт является важным обстоятельством.

Таким образом, приведенные по условию (8) расчеты с последующим определением точек профиля ИИП фрезы можно признать как начальные в принятии решения об использовании какой-либо имеющейся фрезы для получения требуемой упорной резьбы. При необходимости выполнения требований по точности резьбы следует применять методики, приведенные нами в обзорной части данной статьи.

Выводы

1. Предлагаемая методика определения возможности резьбофрезерования упорных резьб на трехкоординатных станках с ЧПУ является достаточной для начального этапа разработок технологического процесса, она основана на классическом принципе – принципе существования исходной инструментальной поверхности для заданной схемы обработки и заданного инструмента. Такое существование определяется наличием решений для уравнения характеристики, что отражено в полученных неравенствах.

2. Для ускорения расчетов достаточно рассмотреть только точки на наружном диаметре внутренней резьбы.

3. Применение после определения аргумента уравнения характеристики уже известных уравнений для расчета координат точек профиля фрезы позволяет в офисных программах типа MS Excel рассчитать и построить профиль ИИП фрезы, на основании чего далее принять решение о подточке фрезы для повышения точности обработки упорных резьб.

Список литературы

1. Щуров И.А. Расчёт точности обработки и параметров мерных инструментов на основе дискретного твердотельного моделирования: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 320 с.
2. Thread turning. Thread milling. Main catalog / Vardex, Vargus. 2017. 412 p.
3. Лашнев С.И. Расчёт и конструирование инструмента с применением ЭВМ. М.: Машиностроение, 1975. 392 с.
4. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. Киев: Вища школа, 1986. 455 с.
5. Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов / под ред. Г.Н. Кирсанова. М.: Машиностроение, 1986. 288 с.
6. Radzevich S.P. Generation of Surfaces: Kinematic Geometry of Surface Machining // CRC Press, 2014. 738 p. DOI: 10.1201/b16398.
7. Kang S.K., Ehmann K.F., Lin C.A CAD approach to helical groove machining. I. Mathematical model and model solution // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 1996. Vol. 36, no. 1. P. 141–143. DOI: 10.1016/0890-6955(95)92631-8.
8. Kang S.K., Ehmann K.F., Lin C. A CAD approach to helical groove machining. II. Numerical evaluation and sensitivity // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 1997. Vol. 37, no. 1. P. 101–117. DOI: 10.1016/0890-6955(95)00039-9.
9. Hsieh J.-F. Mathematical model and sensitivity analysis for helical groove machining // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. Vol. 46. P. 1087–1096. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.08.012.
10. Chiang C.J., Fong Z.H., Tseng J.T. Computerized simulation of thread form grinding process // Mechanism and Machine Theory. 2009. Vol. 44. P. 685–696. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.05.001.
11. Chiang C.J., Fong Z.H. Undercutting and interference for thread form grinding with a tilt angle // Mechanism and Machine Theory. 2009. Vol. 44. P. 2066–2078. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2009.05.011.
12. Fromentin G., Döbbeler B., Lung B. Computerized simulation of interference in thread milling of non-symmetric thread profiles // Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. P. 496–501. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.018.
13. Jia J., Song W., Huang M., Zhang Y., Yuan X., Zhang X., Tang D., Zhang T., Xue Z., Jiang Y. Error control method using crossed axes strategy in the five-axis thread milling process // Springer Nature. Scientific Reports. 2025. Vol. 15, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-025-95159-8.
14. Мальков О.В., Лагойский И.Д. Анализ технологической и кинематической возможностей формообразования упорной резьбы фрезой общего положения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 1. С. 21–32. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-21-32.
15. Мальков О.В. Способ профилирования внутренних резьб при фрезеровании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 7. С. 22–34. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-7-22-34.
16. Мальков О.В., Лагойский И.Д. Экспериментальное исследование фрезерования упорной резьбы инструментом общего положения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 10. С. 34–43.
17. Ahn J.H., Kang D.B., Lee M.H. et al. Investigation of cutting characteristics in side-milling a multi-thread worm shaft on automatic lathe // CIRP Annals. 2006. Vol. 55, iss. 1. P. 63–66. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60367-9.
18. Solid & Indexable Thread Milling. Internal/External. Technical Information / ToolFlo, IMC Group. Houston, USA, 2024. 124 p.

19. Yamnikov A.S., Pozumentschchikov I.K., Yamnikova O.A. Thread milling errors // Dynamics of Technical Systems (DTS 2020). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1029. 012095. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012095.
20. Lee S.W., Nestler A. Simulation-aided design of thread milling cutter // Procedia CIRP. 2012. Vol. 1. P. 120–125. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.019.
21. Shchurov I.A., Nemitova E.V., Shchurova A.V., Ardashev D.V. Metric Buttress Thread Milling and Turning on CNC Machines // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 15, iss. 2. P. 5146–5160. DOI: 10.15282/ijame.15.2.2018.1.0398.
22. Thread turning and thread milling. Application guide / Sandvik Coromant. 2012. 118 p.

References

1. Shchurov I.A. *Raschet tochnosti obrabotki i parametrov mernyh instrumentov na osnove diskretnogo tverdotel'nogo modelirovaniya* [Calculation of machining accuracy and parameters of tools based on discrete solid modeling]. Chelyabinsk, 2004. 320 p.
2. *Thread turning. Thread milling. Main catalog*. Vardex. Vargus. 2017. 412 p.
3. Lashnev S.I. *Raschet i konstruirovaniye instrumenta s primeneniem EVM* [Calculation and design of tools using computers]. M., 1975. 392 p.
4. Rodin P.R. *Metallorazhushchie instrumenty* [Metalcutting tools]. Kiev, 1986. 455 p.
5. Kirsanov G.N. *Rukovodstvo po kursovomu proektirovaniyu metallorazhushchih instrumentov* [Guide to Coursework Design of Metal Cutting Tools]. Moscow, 1986. 288 p.
6. Radzevich, S.P. Generation of Surfaces: Kinematic Geometry of Surface Machining. *CRC Press*. 2014. 738 p. DOI: 10.1201/b16398.
7. Kang S.K., Ehmann K.F., Lin C. A CAD approach to helical groove machining. I. Mathematical model and model solution. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1996, vol. 36, no. 1, pp. 141–143. DOI: 10.1016/0890-6955(95)92631-8.
8. Kang S.K., Ehmann K.F., Lin C. A CAD approach to helical groove machining. II. Numerical evaluation and sensitivity. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1997, vol. 37, no. 1, pp. 101–117. DOI: 10.1016/0890-6955(95)00039-9.
9. Hsieh J.-F. Mathematical model and sensitivity analysis for helical groove machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, vol. 46, pp. 1087–1096. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.08.012.
10. Chiang C.J., Fong Z.H., Tseng J.T. Computerized simulation of thread form grinding process. *Mechanism and machine theory*, 2009, vol. 44, pp. 685–696. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.05.001.
11. Chiang C.J., Fong Z.H., Undercutting and interference for thread form grinding with a tilt angle. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, vol. 44, pp. 2066–2078. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2009.05.011.
12. Fromentin G., Döbbeler B., Lung B. Computerized simulation of interference in thread milling of nonsymmetric thread profiles. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 496–501. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.018.
13. Jia J., Song W., Huang M., Zhang Y., Yuan X., Zhang X., Tang D., Zhang T., Xue Z., Jiang Y. Error control method using crossed axes strategy in the five-axis thread milling process. *Springer Nature. Scientific Reports*, 2025, vol. 15(1). DOI: 10.1038/s41598-025-95159-8.
14. Malkov O.V., Lagoysky I.D. Analysis of the Technological and Kinematic Possibility in Shaping Buttress Thread with the General Position Cutter. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 21–32. (In Russ.) DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-21-32
15. Malkov O.V. Method of the internal threads profiling at milling. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 22–34. (In Russ.) DOI: 10.18698/0536-1044-2023-7-22-34
16. Malkov O.V., Lagoysky I.D. Experimental research of the buttress thread milling with a general position tool. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 10, pp. 34–43. (In Russ.)
17. Ahn J.H., Kang D.B., Lee M.H., Kim H.Y., Kim S.H., Cho K.K. Investigation of cutting characteristics in side-milling a multi-thread worm shaft on automatic lathe. *CIRP Annals*, 2006, vol. 55, iss. 1, pp. 63–66. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60367-9.

18. *Solid & Indexable Thread Milling. Internal/External. Technical Information.* USA. Houston. ToolFlo. IMC Group, 2024. 124 p.

19. Yamnikov A.S., Pozumentschikov I.K., Yamnikova O.A. Thread milling errors. *Dynamics of Technical Systems (DTS 2020) IOP, Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1029, 012095. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012095.

20. Lee S.W., Nestler A. Simulation-aided design of thread milling cutter. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 120–125. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.019.

21. Shchurov I.A., Nemitova E.V., Shchurova A.V., Ardashev D.V. Metric Buttress Thread Milling and Turning on CNC Machines. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 15, iss. 2, pp. 5146–5160. DOI: 10.15282/ijame.15.2.2018.1.0398.

22. *Thread turning and thread milling. Application guide.* Sandvik Coromant. 2012, 118 p.

Информация об авторах

Щуров Игорь Алексеевич, д.т.н., первый заместитель директора Политехнического института, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shchurovia@susu.ru

Щурова Анна Владимировна, к.т.н., доцент кафедры технологий автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shchurovaav@susu.ru

Немытова Елена Владимировна, инженер ООО «АЛЬТАИР ПЛЮС», Челябинск, Россия; thage@mail.ru

Information about the authors

Igor A. Shchurov, doctor of science, first deputy director of Engineering and Technology Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shchurovia@susu.ru

Anna V. Shchurova, PhD, assistant professor of automated machine building technology department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shchurovaav@susu.ru

Elena V. Nemitova, engineer of PC “Altair plus”, Chelyabinsk, Russia; thage@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.08.2025; принята к публикации 20.09.2025.

The article was submitted 20.08.2025; accepted for publication 20.09.2025.