

УДК 621.993

doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-22-34

Способ профилирования внутренних резьб при фрезеровании

О.В. Мальков

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Method of the internal threads profiling at milling

O.V. Malkov

Bauman Moscow State Technical University

Анализ работ, посвященных резьбофрезерованию, показал, что изготовление резьб со специальным профилем, отличным от метрического, исследовано недостаточно. На основании данных анализа профиля существующих резьб предложена обобщенная схема профилирования на примере круглой резьбы, которая на основе теории огибающих семейства положений режущего инструмента позволяет провести анализ формы профиля полученной резьбы и профилирование режущего инструмента при формообразовании с использованием кинематической схемы резьбофрезерования с параллельными осями резьбы и инструмента. Приведены математические выражения, позволяющие рассчитать геометрическую погрешность круглой резьбы с помощью предложенного способа и спрофилировать резьбовую фрезу для формирования резьбы принятой степени точности. Указанный способ можно распространить на резьбу с любым профилем, описываемым математическим выражением в ее осевой плоскости. Результаты исследования могут быть полезны конструкторам при проектировании резьбовых фрез и технологам для оценки возможности использования резьбофрезерования при обработке резьб с круглым профилем.

Ключевые слова: кинематическая схема резьбофрезерования, профилирование внутренних резьб, круглая резьба, точность резьбы

Analysis of the works devoted to thread milling showed that milling of the threads with a special profile differing from the metric profile was not sufficiently studied. Based on data of the existing threads profile analysis, the paper proposes a generalized profiling scheme using the example of a round thread. The theory of envelopes of the cutting tool positions family makes it possible to analyze the shape of the resulting thread profile and the cutting tool profiling in shaping with a kinematic scheme of thread milling with the parallel thread and tool axes. Mathematical expressions are provided that allow calculating geometric error in the round thread using the proposed method and profiling a thread cutter to form the thread of the accepted accuracy degree. The specified method could be extended to a thread with any profile described by a mathematical expression in its axial plane. Study results could be useful to the developers in designing the thread mills and to the technologists to assess the possibility of using thread milling in machining threads with the round profile.

Keywords: thread milling kinematic scheme, internal thread profiling, round thread, thread accuracy

Резьбофрезерование — прогрессивный способ выполнения резьбы, позволяющий автоматизировать изготовление внутренних резьб в

корпусных деталях на станках с числовым программным управлением, обладающий универсальностью и надежностью и обеспечивающий

высокое качество обработки заготовок из различных материалов, в том числе высокотвердых [1, 2].

Резьбы, используемые в промышленности, различаются по расположению (наружные, внутренние), наклону образующей (цилиндрические, конические), форме профиля (треугольные, трапециевидные, прямоугольные, круглые), числу заходов (одно-, многозаходные), направлению (правые, левые), системе размерности (метрические, дюймовые, модульные, питчевые), точности, эксплуатационному назначению (крепёжные, ходовые, регулировочные, герметичные).

Анализ режущих инструментов (РИ) для резьбофрезерования, показал, что наибольшая доля их производства приходится на резьбовые фрезы для изготовления метрических резьб шестой и седьмой степеней точности. Также выпускают РИ для получения дюймовых резьб, цилиндрических и конических трубных резьб, цилиндрической резьбы Витворта (в штуцерах и деталях для вентилей газовых баллонов), резьбы стальных панцирных труб (в электротехнических изделиях), трапециевидной резьбы (в ходовых винтах, зажимных элементах), резьбы «американский батресс» (в обсадных трубах для горного дела).

Ограничен выпуск РИ для выполнения упорной резьбы (с углами боковых сторон 7 и 45°), отсутствует производство РИ для изготовления резьб с углами боковых сторон ме-

нее 7° (прямоугольные, упорные по ГОСТ 10177-82 и DIN 513, трапециевидные по ГОСТ 33758-2016, ГОСТ 34057-2017 и резьбы для соединений API Buttress согласно API Spec 5B-2008-2).

Эти ограничения обусловлены геометрической погрешностью кинематической схемы резьбофрезерования с параллельными осями резьбы и РИ [3], когда в результате несовпадения траектории движения зубьев РИ и винтовой линии формируемой резьбы происходит увеличение ее собственного среднего диаметра. Это снижает степень точности резьбы, а в некоторых случаях приводит к невозможности ее формообразования [3-6].

Анализ литературных источников показал [1-13], что большинство авторов уделяют внимание оценке точности метрических резьб при фрезеровании (как наиболее используемых), при этом ограничена информация по профилированию специальных резьб (круглых, для трубной промышленности и др.).

Таким образом, разработка способа профилирования резьб с профилем разной формы при резьбофрезеровании с применением кинематической схемы с параллельными осями резьбы и РИ является актуальной задачей и позволит его использовать для оценки точности резьб любого типа.

Для выбора объекта исследования на рис. 1 условно показаны элементы основных типов резьбовых соединений (РС), для которых в таб-

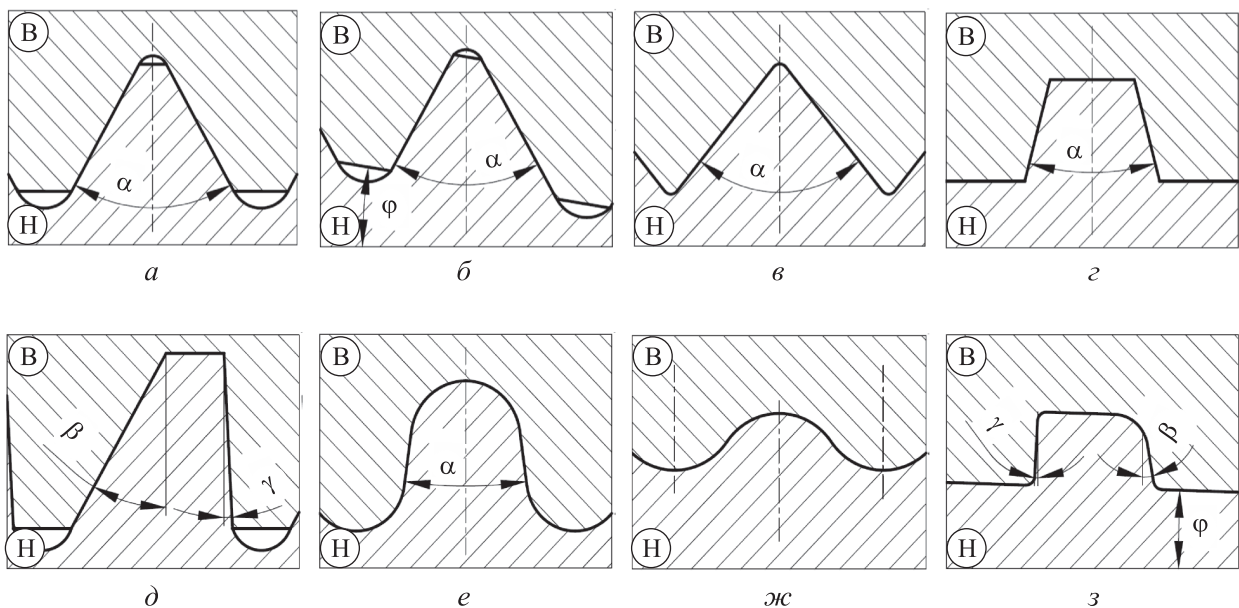


Рис. 1. Схемы профилей РС:
Н и В — наружная и внутренняя резьба

лице указаны значения углов профиля, примеры стандартов и область их использования. Профили РС условно отображают приведенные в таблице РС и являются объединяющими для гаммы подобных резьб без учета формы вершины и впадины, а также зазоров в РС.

Анализ данных, приведенных на рис. 1 и в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

- совокупное влияние шага резьбы и углов наклона боковых сторон определяет высоту ее основного профиля: чем больше шаг резьбы, например упорной (рис. 1, *д*) или круглой (рис. 1, *е*), и меньше угол наклона боковой стороны, тем выше профиль;

- ограничением высоты профиля резьбы является ширина ее вершины и впадины, с увеличением которых уменьшается высота основно-

го профиля резьбы, например трапецеидальной (рис. 1, *з*);

- все показанные профили резьб сочетают отрезки, дуги окружностей или их комбинации, что позволяет использовать обобщенную модель профиля резьбы (содержащего отрезки и дуги окружностей) для исследования ее точности при фрезеровании.

Обзор литературных источников выявил разнообразие подходов к исследованию профилирования винтовых поверхностей, в том числе резьб [3, 5, 7, 8, 11–17]. Большая часть работ посвящена профилированию метрических резьб, что не позволяет распространить полученные в них результаты на профилирование резьб произвольного профиля, сочетающего отрезки с кривыми.

Типы резьб с основным профилем разной формы

Обозначение	Тип профиля (см. рис. 1)	Угол профиля, град		Пример стандарта	Область применения
		α			
		γ	β		
<i>M, MJ, UN, UNJ, UNEF</i>	<i>a</i>	60		ГОСТ 24705–2004, DIN 13, ANSI B1.1	Крепежные изделия
<i>BSW, BSF</i>	<i>a</i>	55		BS 84, OCT НКТП 1260	
<i>G, Rp, BSP, BSPP</i>	<i>a</i>			ГОСТ 6357–81, ISO 228	Детали трубопроводов
<i>R, BSPT</i>	<i>б</i>			ГОСТ 6211–81, BS 21	
<i>NPS, NPSF</i>	<i>a</i>	60		ANSI B1.20.1	
<i>K¹, MK², NPT, NPTF</i>	<i>б</i>			ГОСТ 6111–52, ГОСТ 25229–82, ANSI B1.20.1	
<i>Pg</i>	<i>в</i>	80		DIN 40430	Электротехнические изделия
<i>API Round</i>	<i>б</i>	60		API STD 5B, ГОСТ Р 51906–2002	Обсадные, насосно-компрессорные трубы и трубопроводы
<i>Tr</i>	<i>з</i>	30		ГОСТ 9484–81, DIN 103	Кинематические механизмы
<i>ACME</i>		29		ANSI B1.5	
–		5	5	ГОСТ Р 51682–2000	Обсадные трубы
<i>S</i>	<i>д</i>	3	30	ГОСТ 10177–82, DIN 513-1	Изделия для восприятия односторонней осевой нагрузки
		3	45	ГОСТ 13535–87	Детали, испытывающие большую знакопеременную нагрузку
		7	45	ANSI/ASME B1.9	Изделия для восприятия односторонней осевой нагрузки, обсадные трубы
		0	45	DIN 2781	Гидравлические прессы

Окончание таблицы

Обозначение	Тип профиля (см. рис. 1)	Угол профиля, град		Пример стандарта	Область применения
		α			
		γ	β		
KS	δ	10	40	DIN 6063.1	Пластмассовые емкости с упорной резьбой
		10	10	DIN 6063.2	
Kp^1, Rd	e	15°56'		DIN 262	Тяговые крюки, тормозные тяги железнодорожного транс- порта
		30		ГОСТ 13536–68, DIN 264, DIN 405	Санитарно-техническая арма- тура, изделия для пищевой промышленности, системы пожаротушения, детали проти- вогазов
E^3	$ж$	–		ГОСТ 6042–83	Элементы для предохраните- лей, цоколи ламп и патронов
K^4, KU^4		–		ГОСТ 17196–77	Коронки для бурения шпуров и скважин
<i>API Buttress</i>	$з$	3	10	API Spec 5B, ГОСТ 34057–2017	Обсадные, насосно-компрес- сорные трубы, трубы для тру- бопроводов
<p><i>Примечания.</i></p> <p>¹ Обозначения согласно ГОСТ 6111–52, отличающиеся от зарубежных стандартов.</p> <p>² Метрическая коническая резьба по ГОСТ 25229–82.</p> <p>³ Круглая резьба с профилем без прямолинейных участков на боковых сторонах.</p> <p>⁴ Резьба круглая (K) с профилем без прямолинейных участков и кругло-упорная (KU), где с одной стороны угол составляет 22°(25°) к ее оси резьбы.</p>					

Анализ результатов ранее проведенных работ по профилированию внутренней метрической резьбы и расчету максимального значения геометрической погрешности ее профиля Δr_{\max} показал [3], что после формообразования резьбы по кинематической схеме с параллельными осями РИ и резьбы ее средний диаметр увеличивается на $2\Delta r_{\max}$, а ширина впадины ее профиля превышает теоретическую.

Цель исследования — разработка схемы профилирования резьб произвольного профиля на примере круглой резьбы (КР), позволяющей анализировать форму ее профиля и профилировать РИ на основе кинематической схемы резьбофрезерования с параллельными осями резьбы и РИ.

Способ профилирования резьб. Кинематическая схема фрезерования внутренней резьбы гребенчатой фрезой, приведенная на рис. 2,

отображает вращение РИ (главное движение вращения D_r) и планетарное движение вдоль винтовой линии резьбы за счет одновременно действующих движений окружной подачи D_s и движения вдоль оси резьбы D_n (могут выполняться заготовкой или фрезой), которые кинематически связаны между собой для обеспечения шага резьбы.

Гребенчатая фреза представляет собой ряд дисков одинаковой формы с общей осью и периодом, равным шагу резьбы. Каждый диск выполняет одинаковую работу по срезанию слоя одной и той же формы, а вершины формообразующих профилей зубьев диска в главном движении резания лежат в плоскости, перпендикулярной оси РИ. Профиль диска имеет переменную высоту, связанную с профилем формируемой резьбы, что приводит к переменному диаметру диска вдоль оси. Поэтому каждый диск можно описать совокупностью дис-

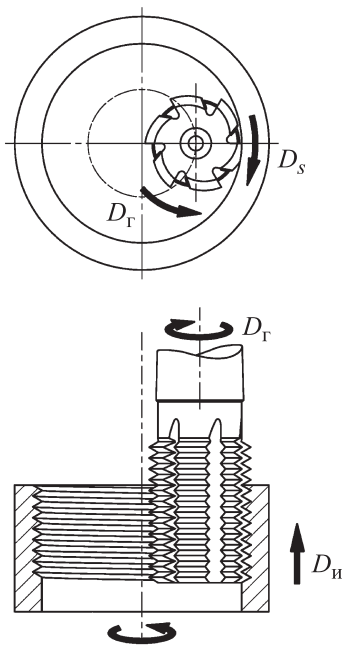


Рис. 2. Кинематическая схема фрезерования внутренней резьбы гребенчатой фрезой

ков нулевой толщины и требуемого диаметра для формообразования резьбы принятой степени точности.

Рассмотрим решение задачи профилирования внутренней резьбы на основе использования огибающей семейства окружностей, описывающих диски нулевой толщины и требуемого диаметра. Расчеты проведем для случая, когда резьбовая фреза имеет скорректированный профиль зуба резьбообразующей части без учета жесткости технологической системы и радиальных биений зубьев РИ.

В качестве объекта исследования выбрана КР, как имеющая фасонный профиль без прямолинейных участков, который может быть преобразованием фасонного профиля произвольной формы. Расчетная схема профилирования резьбы на примере КР с профилем согласно ГОСТ 6042–83 приведена на рис. 3.

Однозаходная резьба в сечении, перпендикулярном ее оси, представляет собой две симметричные ветви спирали, которые при смещении сечения вдоль оси резьбы поворачиваются вокруг ее оси на угол, соответствующий осевому шагу. Будем исходить из утверждения, что при резьбофрезеровании окружности, описывающие диски нулевой толщины разного диаметра, одновременно формообразуют КР вдоль спирали от наружного диаметра до внутреннего (см. рис. 3).

На рис. 3 показан РИ в виде исходной инструментальной поверхности (без стружечных канавок и зубьев) [16], которая в осевом сечении имеет профиль, совпадающий с профилем КР, которая контактирует с РИ в точке M , совпадающей с вершиной резьбы.

Для расчета использована декартова система координат XYZ и полярная система координат, ось ρ которой совпадает с осью OX . Принцип расчета заключается в определении формообразуемой резьбы как огибающей семейства окружностей, представляющих собой траекторию движения точек режущей кромки в соответствующих секущих плоскостях, перпендикулярных оси резьбы.

На рис. 3 от вершины основного профиля КР проведены секущие плоскости, перпендикулярные оси резьбы (показано сечение $A-A$ одной секущей плоскостью на расстоянии $\Delta l'_0$ от точки M). Сечение секущей плоскостью представляет собой окружность с центром в точке l_0 (расположенной на проекции траектории винтового движения оси РИ) и диаметром d_{p1_0} , равным диаметру траектории движения точки на режущей кромке РИ в сечении секущей плоскостью.

Точка l'_0 , расположенная на окружности диаметром d_{p1_0} с центром в точке ϕ_{1_0} , принадлежит отрезку прямой, проведенному через центр резьбы (точку O) и точку l_0 . Угловое положение ϕ_{1_0} окружности в точке l'_0 определяется расстоянием $\Delta_i = f(\phi_i)$ секущей плоскости от точки M . Перемещение секущей плоскости в разных направлениях от точки M дает симметричную картину двух огибающих, которые пересекаются в вершине резьбы (точке M) и ее впадине (точке δ), а вся кривая поворачивается вокруг оси КР на угол, соответствующий смещению Δ .

Перемещая секущую плоскость вдоль основного профиля КР от ее вершины к впадине и сводя все торцовые сечения секущими плоскостями в одну искомую плоскость, получаем семейство окружностей с центрами, расположенными на окружности диаметром

$$d_e = 2e.$$

Здесь e — эксцентриситет при резьбофрезеровании,

$$e = \frac{D - d_p}{2},$$

где D — номинальный диаметр резьбы; d_p — диаметр рабочей части РИ.

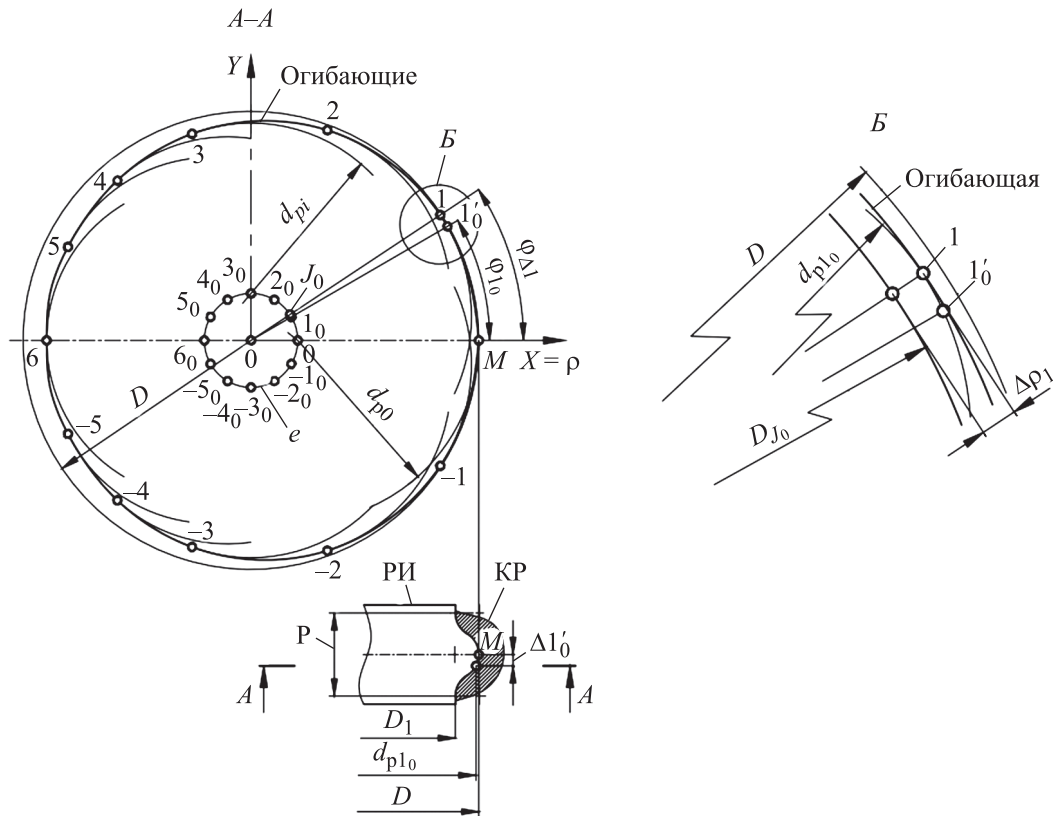


Рис. 3. Расчетная схема профилирования на примере КР

Формообразуемая резьба является оггибающей семейством окружностей, которая касается их в точках, не совпадающих с исходным угловым положением. На увеличенном фрагменте Б показана точка 1 касания оггибающей и окружности 1'0, что определяет угловое положение оггибающей $\Phi_{\Delta 1}$.

Чтобы определить геометрическую погрешность профиля КР $\Delta\rho$, для каждого углового положения оггибающей $\Phi_{\Delta i}$ следует найти расстояние между ней и теоретическим профилем КР. На рис. 3 показана геометрическая погрешность профиля $\Delta\rho_1 = \rho_1 - D_{J_0}/2$, где ρ_1 — радиус-вектор оггибающей в точке контакта (точке 1);

D_{J_0} — диаметр теоретической резьбы, соответствующий полярному углу $\Phi_{\Delta 1}$.

Уравнение оггибающей семейства окружностей определяется системой уравнений с параметром Φ (рис. 4) [18]:

$$\begin{cases} \Phi(x, y, \Phi) = 0; \\ \frac{\partial \Phi(x, y, \Phi)}{\partial \Phi} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Уравнение окружности с центром в произвольной точке плоскости $O(x_0, y_0)$ имеет вид (см. рис. 4)

$$\Phi = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - \left(\frac{d_{pi}}{2}\right)^2 = 0, \quad (2)$$

где $x_0 = e \cos \Phi$; $y_0 = e \sin \Phi$; $e = (D - d_p)/2 = \text{const}$; $d_{pi}/2 = f(\Phi_i)$.

В первом приближении для расчета выбираем профиль РИ, совпадающий с профилем КР (ГОСТ 6042-83). Тогда координаты точек профиля РИ будут совпадать с координатами точек основного профиля КР (рис. 5) при текущем угловом положении Φ .

Для приведения в соответствие параметра Δ , откладываемого от вершины КР, и радиус-

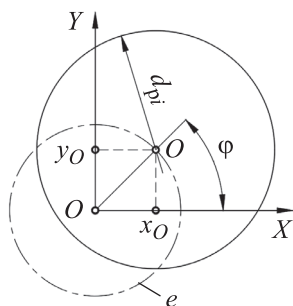


Рис. 4. Расчетная схема для описания функции Φ

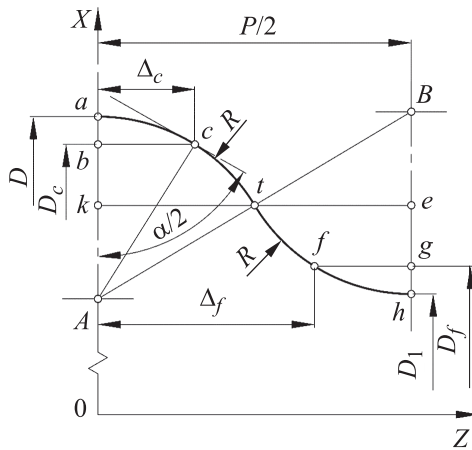


Рис. 5. Расчетная схема параметров КР

вектора КР ρ_ϕ , используем тот факт, что при резбобрезании шаг резьбы P формируется за один планетарный оборот РИ относительно оси КР:

$$\Delta = \frac{P}{2\pi} \phi. \quad (3)$$

С учетом касания окружностей радиуса R (с центром в точках A и B) в точке t (см. рис. 5) и зависимости $\Delta = f(\phi)$ радиус-векторы ρ_ϕ профиля КР можно описать следующими выражениями:

- на участке at для текущей точки c (для текущего диаметра резьбы D_c)

$$\begin{aligned} \rho_{\phi c} &= D/2 - \overline{ab} = D/2 - (R - \sqrt{R^2 - \Delta_c^2}) = \\ &= D/2 - R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\phi_c}{2\pi}\right)^2}; \end{aligned} \quad (4)$$

- на участке th для текущей точки f (для текущего диаметра резьбы D_f)

$$\begin{aligned} \rho_{\phi f} &= \frac{D}{2} - \overline{ak} - (\overline{Bg} - \overline{Be}) = \frac{D}{2} - \left[R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} \right] - \\ &\quad - \left[\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \Delta_f\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} \right] = \\ &= \frac{D}{2} - R + 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \frac{P\phi_f}{2\pi}\right)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогично определяем радиус профиля резбобрезной фрезы:

- на участке at для текущей точки c

$$r_{pc} = d_p/2 - R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\phi_c}{2\pi}\right)^2}; \quad (6)$$

- на участке th для текущей точки f

$$\begin{aligned} r_{pf} &= d_p/2 - R + 2\sqrt{R^2 - (P/4)^2} - \\ &\quad - \sqrt{R^2 - \left(P/2 - \frac{P\phi_f}{2\pi}\right)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

При выборе диаметра РИ следует учитывать, что он связан с диаметром КР эксцентриситетом при резбобрезании, т. е. $d_p = D - 2e$.

Для определения угла профиля резьбы α запишем уравнения касательной к профилю (4) и (5) в произвольной точке с учетом системы координат ZOX (на рис. 5 показана половина угла профиля $\alpha/2$ в точке c) [18]:

- на участке at для текущей точки c (z_c, x_c)

$$\begin{aligned} x &= x'_c(z - z_c) + x_c = \frac{d\rho_{\phi c}}{d\Delta_c}(z - z_c) + \rho_{\phi c} = \\ &= -\frac{\Delta_c}{\sqrt{R^2 - \Delta_c^2}}(z - \Delta_c) + D/2 - R + \sqrt{R^2 - \Delta_c^2}; \end{aligned} \quad (8)$$

- на участке th для текущей точки f (z_f, x_f)

$$\begin{aligned} x &= -\frac{P/2 - \Delta_f}{\sqrt{R^2 - (P/2 - \Delta_f)^2}}(z - \Delta_f) + \frac{D}{2} - R + \\ &\quad + 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \Delta_f\right)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом выражений (8) и (9) половину угла профиля $\alpha/2$ находим по следующим выражениям:

- на участке at для текущей точки c (z_c, x_c)

$$\alpha/2 = \frac{\pi}{2} - \left| \arctg \left(-\frac{\Delta_c}{\sqrt{R^2 - \Delta_c^2}} \right) \right|;$$

- на участке th для текущей точки f (z_f, x_f)

$$\alpha/2 = \frac{\pi}{2} - \left| \arctg \left(-\frac{P/2 - \Delta_f}{\sqrt{R^2 - (P/2 - \Delta_f)^2}} \right) \right|.$$

Важно решить задачу профилирования РИ для формирования КР принятой степени точности. На рис. 6 приведена схема профилирования резбобрезной фрезы для формирования КР с параметрами, соответствующими приведенным на рис. 5. Текущим параметром Δh_i показано радиальное отклонение текущего профиля РИ 2 (см. рис. 6) от первоначального, совпадающего с профилем КР 1.

Задача профилирования РИ — итерационная, так как при пересчете точек огибающей семейства окружностей с измененным радиу-

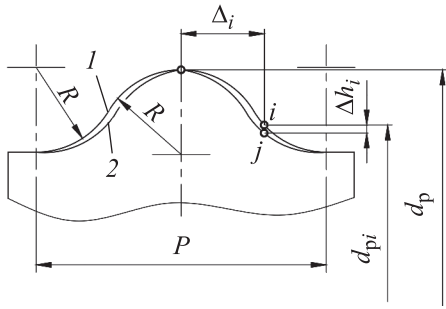


Рис. 6. Схема профилирования резьбовой фрезы для формирования КР

сом будет изменяться положение точек контакта. Учтем при дальнейшем расчете возможность изменения радиуса РИ с целью получения требуемого профиля.

С учетом текущего параметра Δh_i (см. рис. 6) и соотношений (1), (2), (6), (7) получаем следующие выражения:

- на участке *at* для текущей точки *c* в диапазоне $\varphi_c \in [0^\circ, 90^\circ)$ (см. рис. 5)

$$\left\{ \begin{aligned} &(x - e \cos \varphi_c)^2 + (y - e \sin \varphi_c)^2 - \\ &\left[d_p/2 - R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\varphi_c}{2\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right]^2 = 0; \\ &\frac{d}{d\varphi_c} \left\{ (x - e \cos \varphi_c)^2 + (y - e \sin \varphi_c)^2 - \right. \\ &\left. \left[d_p/2 - R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\varphi_c}{2\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right]^2 \right\} = 0; \end{aligned} \right. \quad (10)$$

- на участке *th* для текущей точки *f* в диапазоне $\varphi_f \in [90^\circ, 180^\circ]$

$$\left\{ \begin{aligned} &(x - e \cos \varphi_f)^2 + (y - e \sin \varphi_f)^2 - \left[d_p/2 - R + \right. \\ &\left. + 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \frac{P\varphi_f}{2\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right]^2 = 0; \\ &\frac{d}{d\varphi_f} \left\{ (x - e \cos \varphi_f)^2 + (y - e \sin \varphi_f)^2 - \left[d_p/2 - R + \right. \right. \\ &\left. \left. + 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \frac{P\varphi_f}{2\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right]^2 \right\} = 0. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Взяв производную и выразив *y* из обоих уравнений (10), получаем

$$\begin{aligned} y &= \\ &= \sqrt{\left[\frac{d_p}{2} - R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\varphi_c}{2\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right]^2 - (x - e \cos \varphi_c)^2} + \\ &+ e \sin \varphi_c; \quad (12) \\ y &= \\ &= \frac{P^2 \varphi_c \left(\frac{d_p}{2} - R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\varphi_c}{2\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right)}{2\pi^2 \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\varphi_c}{2\pi}\right)^2}} + 2ex \sin \varphi_c \\ &= \frac{\quad}{2e \cos \varphi_c}; \end{aligned}$$

Взяв производную и выразив *y* из обоих уравнений (11), имеем

$$\left\{ \begin{aligned} &y = \left\{ \left[d_p/2 - R + 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} - \right. \right. \\ &\left. \left. - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \frac{P\varphi_f}{4\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right]^2 - (x - e \cos \varphi_f)^2 \right\}^{1/2} + \\ &+ e \sin \varphi_f; \quad (13) \\ &y = \frac{P^2 \left(1 - \frac{\varphi_f}{\pi} \right)}{4\pi \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \frac{P\varphi_f}{4\pi}\right)^2} e \cos \varphi_f} \left[d_p/2 - R + \right. \\ &\left. + 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \frac{P\varphi_f}{4\pi}\right)^2} - \Delta h_i \right] + \\ &+ \frac{ex \sin \varphi_f}{e \cos \varphi_f}. \end{aligned} \right.$$

При первоначальном расчете с учетом совпадения профилей РИ и основного профиля КР принимаем $\Delta h_i = 0$.

В общем случае системы уравнений (12) и (13) позволяют в аналитическом виде получить параметрическое уравнение огибающей семейства окружностей. Для этого достаточно приравнять ординаты, решить квадратное уравнение, выбрать требуемый корень, получить зависимость $x = f(\varphi)$ и, подставив ее в любое из уравнений системы, найти зависимость $y = f(\varphi)$.

Однако такое аналитическое решение является достаточно громоздким и трудоемким для вычислений, поэтому решение системы уравнений проводилось в программе РТС Mathcad Prime 3.1 с использованием стандартной процедуры поиска решения системы уравнений

Find (x, y) при принятых первоначальных условиях поиска (\hat{x}, \hat{y}) и заданных исходных данных (D, d_p, R, P, φ) . Для расчетных значений (x, y) при заданном значении полярного угла φ можно рассчитать угловое положение точки касания огибающей соответствующей окружности.

Решая системы уравнений (12) и (13), получаем угол точки касания огибающей и окружности

$$f(x) = \varphi_{\Delta} = \begin{cases} \arctg(y/x) & \text{при } 0^{\circ} \leq \varphi_c < 90^{\circ}, \\ \pi + \arctg(y/x) & \text{при } 90^{\circ} \leq \varphi_f \leq 180^{\circ}. \end{cases} \quad (14)$$

Для $\varphi_c \in [0^{\circ}, 90^{\circ})$ в области значений, близких к 90° , точка контакта огибающей и окружности находится во втором квадранте, поэтому угол контакта следует искать по формуле (14) для $90^{\circ} \leq \varphi_f \leq 180^{\circ}$.

Радиус-вектор точек огибающей

$$\rho_i = \sqrt{x(\varphi_{\Delta i})^2 + y(\varphi_{\Delta i})^2}.$$

Для расчета геометрической погрешности профиля сформированной КР $\Delta\rho$ (см. рис. 3) его следует сравнить с радиус-вектором теоретически правильной КР с профилем, соответствующим ГОСТ 6042–83 (см. рис. 5), для полученных значений угла контакта φ_{Δ} :

$$\Delta\rho = \rho(\varphi_{\Delta}) - \rho_{\varphi}(\varphi_{\Delta}).$$

Необходимо учесть, что, согласно выражениям (4) и (5), радиус-вектор теоретически правильной КР определяют для двух диапазонов текущего угла φ , поэтому во втором квадранте следует вычитать радиус КР, рассчитанный для $\varphi_f \in [90^{\circ}, 180^{\circ}]$, особенно в области $\varphi = 90^{\circ}$, где радиус РИ вычисляют для $\varphi_c \in [0^{\circ}, 90^{\circ})$, а точка касания находится уже во втором квадранте. В результате получаем

$$\Delta\rho_i = \begin{cases} \sqrt{x(\varphi_{\Delta i})^2 + y(\varphi_{\Delta i})^2} - D/2 + R - \\ - \sqrt{R^2 - \left(\frac{P\varphi_{\Delta i}}{2\pi}\right)^2} & \text{при } \varphi_{\Delta i} \in [0^{\circ}, 90^{\circ}); \\ \sqrt{x(\varphi_{\Delta i})^2 + y(\varphi_{\Delta i})^2} - D/2 + R - \\ - 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{4}\right)^2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{P}{2} - \frac{P\varphi_{\Delta i}}{2\pi}\right)^2} & \text{при } \varphi_{\Delta i} \in [90^{\circ}, 180^{\circ}]. \end{cases} \quad (15)$$

Подобный подход к расчету геометрической погрешности можно использовать для резьбы с произвольным профилем, содержащим различ-

ные участки — прямые, круглые и произвольного фасонного профиля. Это делает расчет универсальным и позволяет оценивать возможность формообразования резьбы фрезерованием по кинематической схеме с параллельными осями РИ и резьбы, а также степень ее точности.

Расчетные значения геометрической погрешности профиля сформированной резьбы $\Delta\rho$ для полученных значений угла контакта φ_{Δ} позволяют перейти к профилированию РИ. Для этого с помощью выражений (12)–(15) решают итерационную задачу, в которой на первом этапе следует уменьшить текущий радиус резбовой фрезы (6), (7) на геометрическую погрешность профиля резьбы $(\Delta h_i = \Delta\rho_i)$: $r_{pj} = r_{pi} - \Delta\rho_i$.

Этого достаточно, чтобы получить профиль резьбы с радиальным отклонением от основного профиля, не превышающим 1 мкм, что является достаточным для решения инженерной задачи. При необходимости уменьшения отклонения следует провести еще одну итерацию с учетом значения $\Delta h_i = \Delta\rho_i$, определенного после первой итерации.

В результате решения итерационной задачи получаем радиус-вектор сформированной КР, совпадающий с радиусом основного профиля КР и соответствующий этому решению профиль исходной инструментальной поверхности резбовой фрезы.

Анализ геометрической погрешности КР при фрезеровании. На основе расчетной схемы профилирования резьбы и РИ, а также выражений (12)–(15) проведен расчет геометрической погрешности КР E33 (ГОСТ 6042–83) со следующими параметрами: $D = 33,55$ мм, $D_1 = 30,95$ мм, $P = 4,233$ мм, $R = 1,187$ мм. При принятом диаметре рабочей части РИ $d_p = 21$ мм эксцентриситет $e = 6,275$ мм.

Так как литературный обзор не выявил работ, посвященных фрезерованию КР, предварительно диаметр фрезы выбран по рекомендациям [16] для фрезерования метрических резьб из условия $d_p \leq (0,85 \dots 0,90)d_o$, где $d_o = D_1$ — диаметр отверстия под резьбу. Верификация результатов расчетов проведена в программе Autodesk Inventor 2022.

Для указанных исходных данных разработана геометрическая модель резбифрезерования, в которой внутренняя резьба получена вычитанием из заготовки с предварительно сформированным отверстием массива расположенных

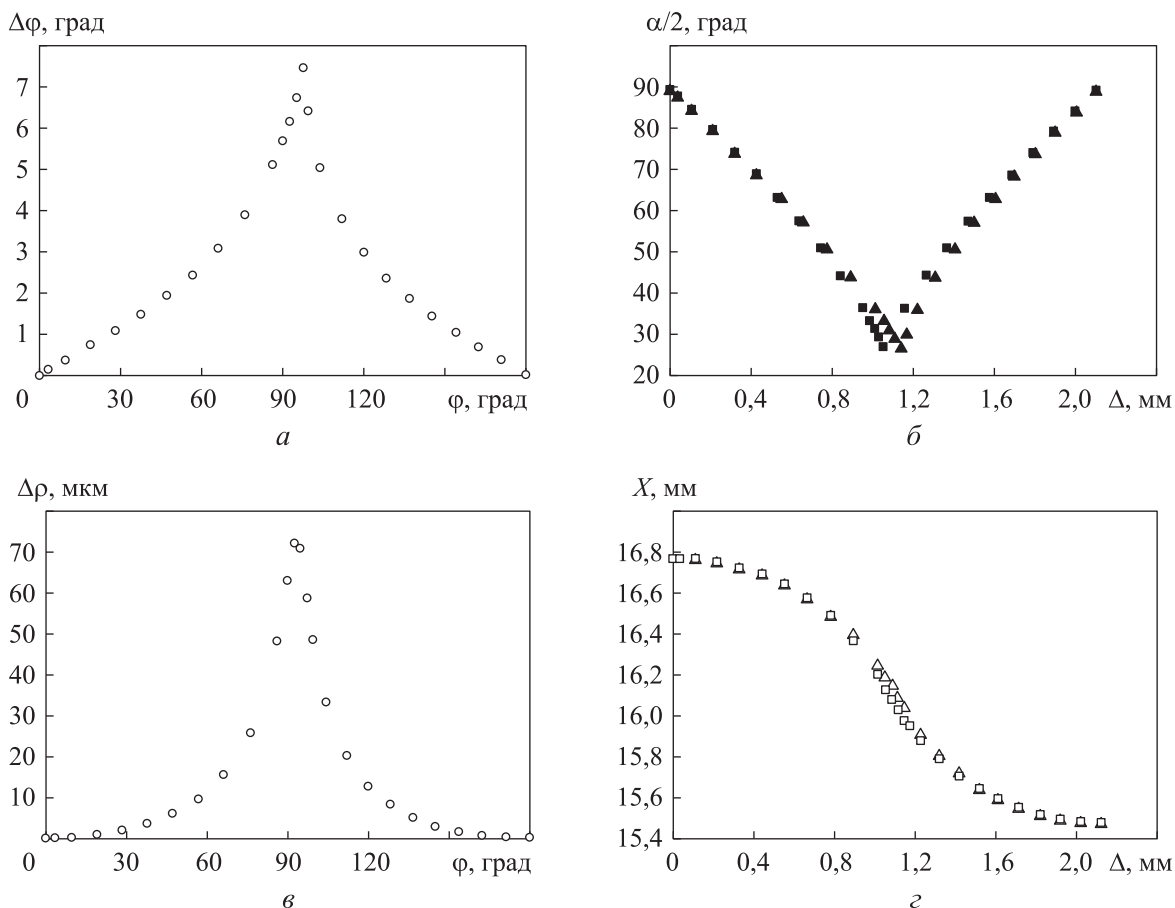


Рис. 7. Зависимости:

- a* — углового отклонения точки касания огибающей и формообразующей окружности $\Delta\varphi$ от полярного угла φ ;
- б* — половины угла $\alpha/2$ теоретического (■) и полученного (▲) профилей КР от смещения Δ ;
- в* — геометрической погрешности формируемой КР $\Delta\rho$ от полярного угла φ ;
- г* — координаты X радиуса профиля r_p КР (Δ) и РИ (□) от смещения Δ

вдоль винтовой траектории движения дисков, характеризующих исходную инструментальную поверхность РИ. Для полярного угла φ_Δ в сечении, перпендикулярном оси КР, проверяли отклонения расчетных значений радиус-вектора $\rho(\varphi_\Delta)$ от измеренных в модели, которые не превысили 10^{-3} мкм, что подтверждает приведенные в работе расчеты.

Зависимость углового отклонения точки касания огибающей и формообразующей окружности $\Delta\varphi = \varphi_\Delta - \varphi$ от полярного угла φ приведена на рис. 7, а. Анализ результатов расчета показывает, что в общем случае угол точки касания огибающей окружности больше, чем заданное значение полярного угла φ , и разница углов $\Delta\varphi$ увеличивается от нуля в вершине резьбы (см. рис. 3), далее достигает максимума, связанного с максимальным значением геометрической погрешности $\Delta\rho$ в этой области, и уменьшается до нуля во впадине резьбы — в точке б (см. рис. 3).

Зависимости половины угла профиля резьбы $\alpha/2$ от смещения Δ показаны на рис. 7, б. Видно, что для теоретического профиля КР минимальное значение угла $\alpha/2$ соответствует касанию дуг окружностей — точке *t* (см. рис. 5, $\varphi = 90^\circ$, $\Delta = 1,058$ мм), а для полученного профиля КР минимальное значение угла $\alpha/2$ смещается в соответствии с углом контакта (см. рис. 7, а).

Зависимость геометрической погрешности формируемой резьбы $\Delta\rho$ от полярного угла φ приведена на рис. 7, в. Анализ графика позволяет заключить следующее:

- максимальное значение геометрической погрешности находится в области касания дуг окружностей — в точке *t* (см. рис. 5) и смещено в сторону увеличения полярного угла из-за смещения точки касания;
- максимальное значение геометрической погрешности соответствует наименьшему углу наклона касательной к оси X в точке *t* на рис. 5

(см. рис. 7, б), что соответствует результатам ранее проведенных исследований [3].

Зависимости координаты X радиуса профиля r_p КР и РИ от смещения Δ показаны на рис. 7, г. Видно, что в результате профилирования КР инструментом с профилем, соответствующим основному профилю КР, получаемый профиль КР отклонен от основного на значение геометрической погрешности $\Delta\rho$ (см. рис. 7, в).

В этом случае решаем итерационную задачу по определению профиля КР инструментом с профилем, скорректированным геометрической погрешностью. В результате проведения первой итерации согласно выражениям (12) и (13), где $\Delta h_i = \Delta\rho_i$, получаем профиль КР с радиальным отклонением от основного профиля, не превышающим 1 мкм, что является достаточным для решения инженерной задачи.

Параметры $\Delta\varphi$ и $\Delta\rho$ определены в торцевом сечении резьбы, поэтому на рис. 7, а и в

приведены их зависимости от полярного угла φ , а параметры $\alpha/2$ и r_p определены в осевом сечении резьбы, поэтому на рис. 7, б, г показаны их зависимости от смещения Δ (связанного с полярным углом φ выражением (3)).

Выводы

1. На примере формообразования КР предложена схема профилирования резьбы и РИ, которая позволяет рассчитывать профиль РИ из условия соответствия получаемой резьбы принятой степени точности.

2. Использование кинематической схемы с параллельными осями резьбы и РИ существенно упрощает расчет за счет определения точек контакта огибающей семейства окружностей.

3. Предложенную последовательность расчета можно использовать для резьбы с любым профилем, заданным в осевом сечении системой математических выражений.

Литература

- [1] Мальков О.В. Анализ способов обработки резьбы фрезерованием. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 4. URL: <http://engineering-science.ru/doc/838440.html>
- [2] Мальков О.В. Основные направления исследования резьбофрезерования и проектирования резьбовых фрез. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 4, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-4-1487>
- [3] Malkov O.V., Malkova L.D. Improving thread accuracy in machining components for rocket and space technologies. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, no. 1, art. 200006, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133364>
- [4] Shchurov I.A., Nemitova E.V., Shchurova A.V. et al. Metric buttress thread milling and turning on CNC machines. *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 5146–5160, doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.15.2.2018.1.0398>
- [5] Fromentin G., Döbbeler B., Lung D. Computerized simulation of interference in thread milling of non-symmetric thread profiles. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 496–501, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.018>
- [6] Лагойский И.Д. Повышение точности формообразования резьбы по планетарной кинематической схеме инструментом общего положения. *Будущее машиностроения России. Сб. док. 14й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 18–25. URL: <https://bmr.bmstu.press/preprints/705/>
- [7] Lee S.W., Nestler A. Simulation-aided design of thread milling cutter. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 120–125, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.019>
- [8] Fromentin G., Poulachon G. Modeling of interferences during thread milling operation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, vol. 49, no. 1, pp. 41–51, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2372-5>
- [9] Araujo A.C., Fromentin G. Investigation of tool deflection during milling of thread in Cr-Co dental implant. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 99, no. 1–4, pp. 531–541, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2520-x>
- [10] Araujo A.C., Mello G.M., Cardoso F.G. Thread milling as a manufacturing process for API threaded connection: geometrical and cutting force analysis. *J. Manuf. Process.*, 2015, vol. 18, pp. 75–83, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.01.002>

- [11] Гречишников В.А., Косарев В.А., Дымов М.С. и др. Математическая модель по оценке исходной инструментальной поверхности при обработке внутренней резьбы. *Вестник МГТУ Станкин*, 2009, № 4, с. 82–89.
- [12] Хандожко А.В. Программный модуль для моделирования процесса обработки винтовых канавок дисковым инструментом. *Вісник СевНТУ*, 2012, № 129, с. 264–267.
- [13] Fromentin G., Sharma V.S., Poulachon G. et al. Effect of thread milling penetration strategies on the dimensional accuracy. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2011, vol. 133, no. 4, art. 041014, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4004318>
- [14] Лашнев С.И. *Профилирование инструментов для обработки винтовых поверхностей*. Москва, Машиностроение, 1965. 151 с.
- [15] Люкшин В.С. *Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов*. Москва, Машиностроение, 1968. 371 с.
- [16] Родин П.Р. *Металлорежущие инструменты*. Киев, Вища школа, 1974. 399 с.
- [17] Левицкий М.Я. *Резьбофрезерование*. Киев, Машгиз, 1950. 192 с.
- [18] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. Москва, Наука, 1986. 544 с.

References

- [1] Malkov O.V. Analysis of the thread milling methods. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 4. URL: <http://engineering-science.ru/doc/838440.html> (in Russ.).
- [2] Malkov O.V. The main directions of thread milling research and thread milling cutter design. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2016, no. 4, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-4-1487> (in Russ.).
- [3] Malkov O.V., Malkova L.D. Improving thread accuracy in machining components for rocket and space technologies. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, no. 1, art. 200006, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133364>
- [4] Shchurov I.A., Nemitova E.V., Shchurova A.V. et al. Metric buttress thread milling and turning on CNC machines. *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 5146–5160, doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.15.2.2018.1.0398>
- [5] Fromentin G., Döbbeler B., Lung D. Computerized simulation of interference in thread milling of non-symmetric thread profiles. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 496–501, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.018>
- [6] Lagoyskiy I.D. [Improvement of accuracy of thread forming using planetary kinematic scheme by a general-position tool]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii. Sb. dok. 14y Vseros. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov*. T. 1 [Proc. Future of Mechanical Engineering in Russia. 14th All-Russ. Conf. Young Scientists and Specialists. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2022, pp. 18–25. URL: <https://bmr.bmstu.press/preprints/705/> (in Russ.).
- [7] Lee S.W., Nestler A. Simulation-aided design of thread milling cutter. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 120–125, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.019>
- [8] Fromentin G., Poulachon G. Modeling of interferences during thread milling operation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, vol. 49, no. 1, pp. 41–51, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2372-5>
- [9] Araujo A.C., Fromentin G. Investigation of tool deflection during milling of thread in Cr-Co dental implant. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 99, no. 1–4, pp. 531–541, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2520-x>
- [10] Araujo A.C., Mello G.M., Cardoso F.G. Thread milling as a manufacturing process for API threaded connection: geometrical and cutting force analysis. *J. Manuf. Process.*, 2015, vol. 18, pp. 75–83, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.01.002>
- [11] Grechishnikov V.A., Kosarev V.A., Dymov M.S. et al. Mathematical model for estimating the initial tool surface when machining internal threads. *Vestnik MGTU Stankin* [Vestnik MSUT Stankin], 2009, no. 4, pp. 82–89. (In Russ.).
- [12] Khandozhko A.V. The software module for simulating the processing of helical grooves disk tool. *Visnik SevNTU*, 2012, no. 129, pp. 264–267. (In Russ.).

- [13] Fromentin G., Sharma V.S., Poulachon G. et al. Effect of thread milling penetration strategies on the dimensional accuracy. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2011, vol. 133, no. 4, art. 041014, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4004318>
- [14] Lashnev S.I. *Profilirovaniye instrumentov dlya obrabotki vintovykh poverkhnostey* [Profiling tools for machining helical surfaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 151 p. (In Russ.).
- [15] Lyukshin V.S. *Teoriya vintovykh poverkhnostey v proektirovanii rezhushchikh instrumentov* [Theory of helical surfaces in designing of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 371 p. (In Russ.).
- [16] Rodin P.R. *Metallorezhushchie instrument* [Metal cutting tools]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1974. 399 p. (In Russ.).
- [17] Levitskiy M.Ya. *Rezbofrezerovanie* [Thread milling]. Kiev, Mashgiz Publ., 1950. 192 p. (In Russ.).
- [18] Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of Mathematics for engineers and students of universities]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 544 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 02.05.2023

Информация об авторе

МАЛЬКОВ Олег Вячеславович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: malkov@bmstu.ru).

Information about the author

MALKOV Oleg Vyacheslavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: malkov@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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

Please cite this article in English as:

Malkov O.V. Method of the internal threads profiling at milling. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 22–34, doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-22-34



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие А.М. Хорехорова «Основы оптики в техническом университете»

Изложена электромагнитная теория света, рассмотрены взаимодействие света с изотропной и анизотропной средами, вопросы фотометрии и теплового излучения, явления поляризации, интерференции и дифракции для когерентного и частично когерентного света, а также элементы квантовой оптики. В приложениях и задачах рассмотрены вопросы практического применения теории.

Для студентов, аспирантов и преподавателей технических университетов, а также для специалистов, работающих в области оптики и ее приложений.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>