

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.99

doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-3-15

Сравнительный анализ точности фрезерования резьб с различным профилем

О.В. Мальков, М.А. Пандуров

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Comparative Analysis of the Accuracy of Milling Threads with Various Profiles

O.V. Malkov, M.A. Pandurov

Bauman Moscow State Technical University

На основе анализа каталогов производителей резьбовых фрез установлены типы резьб, для которых применяют и не применяют фрезерование. Для расширения области использования резьбофрезерования проведено исследование точности геометрического формообразования внутренних резьб различного профиля с применением кинематической схемы, где оси резьбы и инструмента расположены параллельно. На базе геометрической модели резьбофрезерования разработаны расчетная схема и программа формообразования внутренних резьб различного профиля. С помощью плана расчетного эксперимента проведен сравнительный анализ метрической, упорной, круглой резьб и резьбы для соединения обсадных труб, который позволил получить форму профиля резьбы, оценить погрешности профиля, прямолинейность боковых сторон и возможность выполнить резьбу в соответствии с принятой степенью точности. Результаты исследования могут быть полезны конструкторам при проектировании резьбовых фрез и технологам для оценки возможности использования резьбофрезерования при обработке различного профиля.

Ключевые слова: резьбофрезерование, формообразование резьбы, метрическая резьба, упорная резьба, круглая резьба, точность резьбы

The article considers the types of threads to be milled, as well as threads for which milling is not used, based on the analysis of the catalogs of manufacturers of thread cutters. To expand the scope of thread milling, a study of the accuracy of geometric shaping of internal threads of various profiles was made using a kinematic scheme with a parallel arrangement of thread and tool axes. On the basis of the geometric model of thread milling, a design scheme is presented and a program for shaping internal threads of various profiles is developed. Using the developed design experiment plan, a comparative analysis of metric, buttress, round threads and threads for connecting casing pipes was carried out, which allows obtaining the shape of the thread profile, assessing its errors, the straightness of the sides and the possibility of threading according to the accepted degree of accuracy. The results of the study can be useful to designers in designing thread mills and technologists to assessing the possibility of using thread milling in the processing threads of various profiles.

Keywords: thread milling, thread shaping, metric thread, buttress thread, round thread, thread accuracy

Резьбофрезерование занимает все большую область резбонарезания, что связано с такими его достоинствами, как обработка правой и левой, одно- или многозаходной резьбы различного диаметра и одного шага одним типоразмером инструмента в широком диапазоне материалов, образование мелкой стружки, легко удаляемой из зоны обработки, высокое качество обработанной поверхности резьбы и возможность легкого извлечения сломанного инструмента из отверстия [1, 2].

Существует большое количество используемых в промышленности резб, которые различаются по расположению (наружные, внутренние), наклону образующей (цилиндрические, конические), форме профиля (треугольные, трапецидальные, прямоугольные, круглые), числу заходов (одно- и многозаходные), направлению (правые, левые), системе размерности (метрические, дюймовые, модульные, питчевые), точности, эксплуатационному назначению (крепежные, ходовые, регулировочные, герметичные).

Анализ производственных программ изготовителей резьбовых фрез (Carmex Precision Tools Ltd., mimatic Tool Systems, Vargus Ltd., Johs. Boss GmbH & Co. KG, CERATIZIT Group, REIME NORIS GmbH, EROJET LTD., Guhring Inc., Walter AG, Advent Tool & Manufacturing Inc., Kennametal Inc., Sandvik Coromant, Emuge Corporation, ЗАО «НИР», ООО «СпецИнструмент», ООО НПП «РИТ Инжиниринг») показал, что выпускаемые инструменты в основном предназначены для фрезерования метрических резб шестой и седьмой степеней точности.

Также производятся (см. таблицу) резьбовые фрезы для изготовления дюймовых резб, цилиндрических и конических трубных резб, цилиндрической резьбы Витворта (штуцеры и детали для вентилях газовых баллонов), резьбы стальных панцирных труб (электротехнические изделия), трапецидальной резьбы (ходовые винты, зажимные элементы), резьбы Buttress (обсадные трубы в горном деле).

В таблице введены следующие обозначения производителей резьбовых фрез: CA — Carmex Precision Tools Ltd.; M — mimatic Tool Systems; V — Vargus Ltd.; JBO — Johs. Boss GmbH & Co. KG; CE — CERATIZIT Group; RN — REIME NORIS GmbH; EJ — EROJET LTD.; G — Guhring Inc.; W — Walter AG; AT — Advent Tool & Manufacturing Inc.; KE — Kennametal Inc.; SC — Sandvik Coromant; E — Emuge Corporation;

НИР — ЗАО «НИР»; СИ — ООО «СпецИнструмент»; РИТ — ООО НПП «РИТ Инжиниринг». Знаком «v» обозначено наличие у производителя инструмента, предназначенного для изготовления указанной резьбы.

Одна из причин ограниченной номенклатуры резьбовых фрез (см. таблицу) связана с геометрической погрешностью, возникающей при формообразовании с применением кинематической схемы, где оси резьбы и инструмента расположены параллельно [3, 4].

В результате несовпадения траектории движения зубьев резьбовой фрезы и направления винтовой линии формообразуемой резьбы при использовании указанной кинематической схемы возникает геометрическая погрешность профиля резьбы, которая в ряде случаев приводит к несоответствию принятой степени точности [4–6].

Существуют резьбы — упорные (по ГОСТ 10177–82 и DIN 513), трапецидальные (по ГОСТ 33758–2016 и ГОСТ 34057–2017) и резьбы для соединений API Buttress (согласно API Spec 5B-2008-2) — с малым углом одной или двух сторон профиля, которые невозможно или крайне трудно (при определенном сочетании параметров резьбы и инструмента) изготовить резьбофрезерованием по кинематической схеме с параллельными осями резьбы и инструмента [4–6].

Анализ литературы [3–14] показывает, что большая часть публикаций посвящена оценке точности и фрезерованию метрических резб, меньшая — степени трапецидальной и упорной резб. Отсутствуют работы по фрезерованию упорной резьбы с углами профиля 3 и 30°, резб трубной промышленности с углами профиля 3 и 10° (например, ОТТГ и ОТТМ) и др.

В работе [6] решалась прямая задача по определению профиля упорной резьбы с учетом известного профиля резьбовой фрезы, а затем с учетом полученной геометрической погрешности итерационно — обратная задача, при которой происходит коррекция полученного профиля зуба инструмента на величину геометрической погрешности, что позволяет получить упорную резьбу принятой степени точности.

Однако в работе [6] приведены результаты расчетов для минимального наклона боковой стороны резьбы (10°), что позволяет провести профилирование инструмента для ее изготовления. Косвенным подтверждением этому мо-

гут служить резьбовые фрезы (например, производителей Vargus Ltd. или Emuge Corporation), предназначенные для получения упорной резьбы с углами наклона ее боковых сторон 7 и 45°.

В публикации [4] показано, что при уменьшении угла наклона боковой стороны резьбы с 20 до 10° геометрическая погрешность увеличивается до 8 раз, что может превысить поле допуска резьбы. Следует ожидать, что уменьшение угла наклона боковой стороны резьбы до 3° не позволит ее формообразовать, что косвенно подтверждено отсутствием подобных резьбовых фрез в каталогах производителей.

Таким образом, исследование точности формообразования резьб большинства существующих профилей является актуальной задачей и позволит расширить область использования резьбофрезерования или шлифования по кинематической схеме с параллельным расположением осей резьбы и инструмента.

Цель работы — исследование точности геометрического формообразования внутренних резьб различного профиля с использованием кинематической схемы, где оси резьбы и инструмента расположены параллельно.

Элементы резьбовых соединений, приведенных в таблице, условно показаны на рис. 1. Анализ таблицы показывает, что резьбофрезерование наиболее широко применяют для обработки резьбы трубных и крепежных соединений, профиль которых имеет угол 55 или 60°, в меньшей степени — специальной резьбы (для электротех-

нических изделий с углом 80°), трапецеидальной с углами 29 и 30°, упорной с углами 7 и 45° и круглой резьбы с углом 30°. Резьбофрезерование не используют для резьб с малыми углами одной или двух боковых сторон (5 и 5°, 3 и 10°, 3 (0)° и 30 (45)°), углом профиля 15°56'.

При этом не рассмотрены резьбы, полученные другими методами обработки (литьем, давлением и пр.). Профили резьбовых соединений (см. рис. 1), условно отображенных в таблице, являются объединяющими для подобных резьб без учета формы вершины и впадины.

Расчетная модель определения профиля резьбы.

Геометрическая модель формообразования внутренней резьбы по кинематической схеме с параллельными осями инструмента и резьбы приведена на рис. 2. В модели инструмент заменен исходной инструментальной поверхностью (ИИП), т. е. поверхностью диска диаметром d_d с высотой профиля h , полученной вращением в главном движении резания пространственной режущей кромки резьбовой фрезы.

ИИП представляет собой два усеченных конуса с одинаковыми диаметрами оснований, соединенных по основанию большего диаметра с цилиндром высотой a , который образует вершину профиля инструмента с углом 60°. Примем, что полученный диск, условно имеющий один зуб, за один оборот вокруг своей оси перемещается на величину, соответствующую подаче на зуб вдоль винтовой траектории диаметром $d_{сп}$.

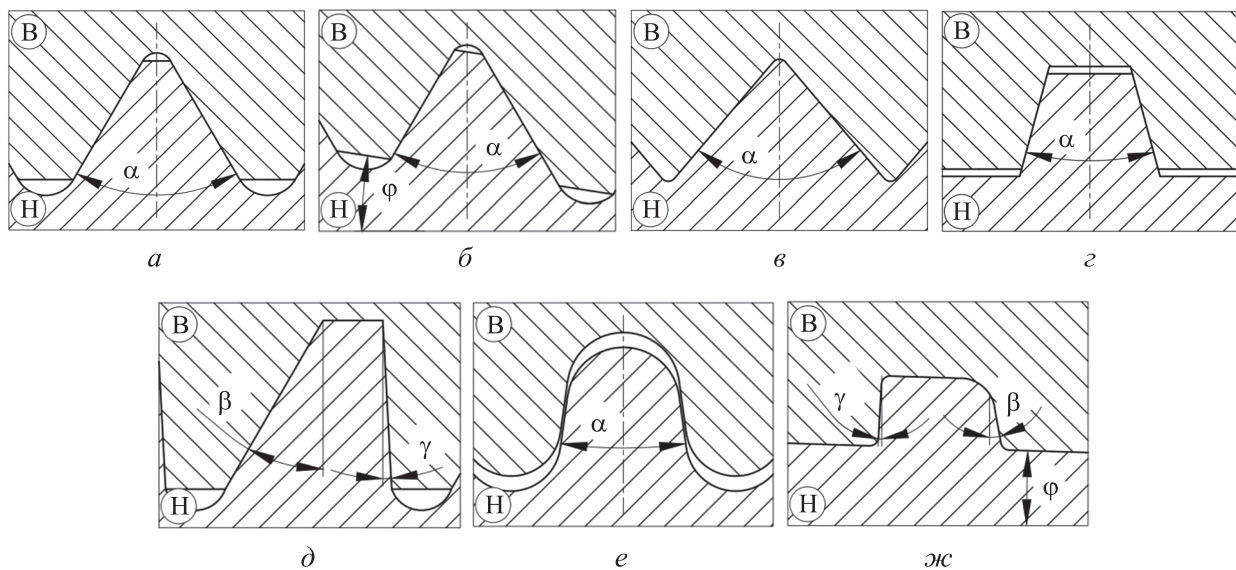


Рис. 1. Профили резьбовых соединений:
Н и В — наружная и внутренняя резьба

Типы резьб, обрабатываемых фрезерованием

Обозначение	Код обозначения производителя														Тип профиля	Угол профиля, град		Пример стандарта	Область применения		
	CA	M	V	JBO	CE	RN	EJ	G	W	AT	KE	SC	E	HIP		GN	PIT			α	β
M, MJ, UN, UNJ, UNEF	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	60	ГОСТ 24705–2004, DIN 13, ANSI B1.1	Крепежные изделия		
BSW, BSF	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, а	55	BS 84, OCT НКТП 1260			
G, Rp, BSP, BSPP	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, б	ГОСТ 6357–81, ISO 228	Детали трубопроводов			
R, BSPT	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	ГОСТ 6211–81, BS 21					
NPS, NPSF	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, а	ANSI B1.20.1	Электротехнические изделия			
K ¹ , MK ² , NPT, NPTF	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, б	ГОСТ 6111–52, ГОСТ 25229–82, ANSI B1.20.1				
Pg	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, в	DIN 40430				
API Round	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, б	API STD 5B, ГОСТ Р 51906–2002	Кинематические механизмы			
Tr	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, з	ГОСТ 9484–81, DIN 103				
ACME	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, з	ANSI B1.5	Обсадные трубы			
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5	ГОСТ Р 51682–2000				
S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	рис. 1, д	3	ГОСТ 10177–82, DIN 513–1	Изделия для восприятия одно-сторонней осевой нагрузки		
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3	ГОСТ 13535–87				
–	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	рис. 1, д	7	ANSI/ASME B1.9	Изделия для восприятия одно-сторонней осевой нагрузки, обсадные трубы		
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	DIN 2781				

Окончание таблицы

Обозначение	Код обозначения производителя													Тип профиля	Угол профиля, град			Пример стандарта	Область применения			
	CA	M	V	BO	CE	RN	EJ	G	W	AT	KE	SC	E		NIP	CI	PII			α	γ	β
KS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	40	DIN 6063.1	Пластмассовые емкости с упорной резьбой		
Kp ¹ , Rd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	DIN 6063.2	Тяговые крюки, тормозные тяги железнодорожного транспорта		
E ⁴	v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	v ³	-	-	-	-	-	30	-	ГОСТ 13536-68, DIN 264, DIN 405	Санитарно-техническая арматура, пищевая промышленность, системы пожаротушения, детали пропивогазов		
K ⁵ , KU ⁶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ГОСТ 6042-83	Элементы для предохранителей, цоколи ламп и патронов		
API Buttress	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	10	API Spec 5B, ГОСТ 34057-2017	Коронки для бурения шпуров и скважин Обсадные, насосно-компрессорные трубы, труб для грубопроводов		

Примечания:

¹ Обозначения согласно ГОСТ6111-52, отличающиеся от зарубежных стандартов.

² Метрическая коническая резьба по ГОСТ 25229-82.

³ Резьбовые фрезы изготавливаются по заказу.

⁴ Круглая резьба с профилем, в котором отсутствуют прямолнейные участки на боковых сторонах.

⁵ На профиле круглой резьбы отсутствуют прямолнейные участки.

⁶ На круглой упорной резьбе с одной боковой стороны угол равен 22° (25°) к ее оси.

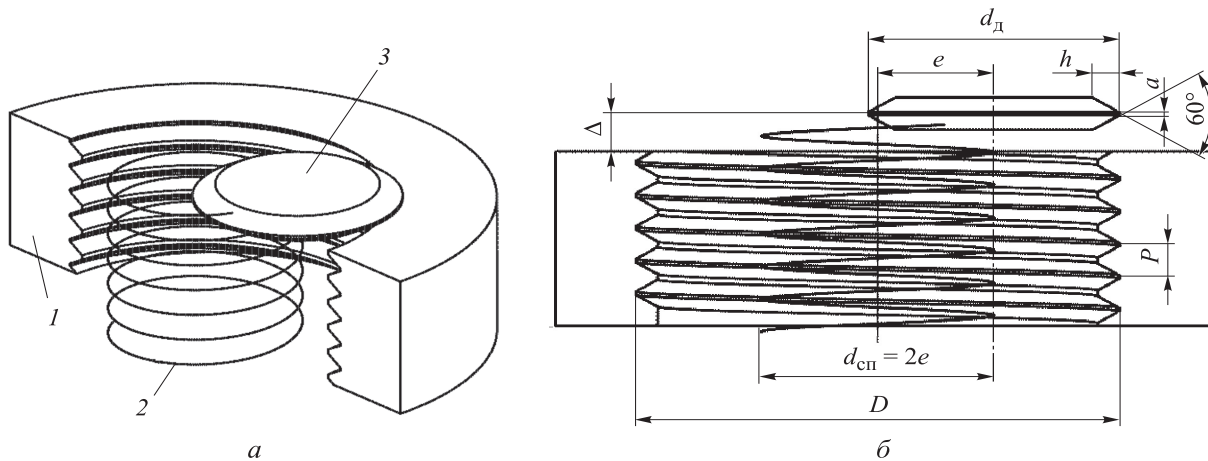


Рис. 2. Геометрическая модель кинематической схемы формообразования внутренней резьбы: а — фрезерование внутренней резьбы (1 — заготовка с резьбой; 2 — траектория движения инструмента; 3 — модель дисковой резьбовой фрезы); б — параметры модели

Используем показанную на рис. 2 модель для численного расчета и определения геометрической погрешности профиля внутренней резьбы с различными углами боковых сторон. Расчетная схема формообразования профиля резьбы для определения ее геометрической погрешности приведена на рис. 3. Инструмент 1 представляет собой диск с обобщенным профилем ИИП, который можно представить набором бесконечно тонких элементарных дисков разного диаметра 2 (рис. 3, а, б), образующих поверхность резьбы. Профиль резьбы образован точками профиля ИИП.

Согласно расчетной схеме, точки одного элементарного диска, смещенного относительно оси резьбы на значение эксцентриситета e (см. рис. 3, а), при движении по винтовой траектории 3 вдоль оси Z (см. рис. 3, б) образуют в рассматриваемой плоскости $X_pO_pZ_p$ кривую 4 (см. рис. 3, б, в).

Множество кривых 5 (см. рис. 3, в), образованных соответствующим множеством элементарных дисков, формирует профиль внутренней резьбы, который описывается огибающей семейства кривых, образующих профиль резьбы. Огибающая определена множеством точек кривых, наиболее удаленных в радиальном направлении, т. е. имеющих при фиксированной величине z_j наибольшую координату x_j .

Формирование точки профиля резьбы условно показано на примере работы диска диаметром d_{fi} , который на поверхности профиля фрезы обозначен формообразующей точкой i , которая в системе координат фрезы ($O_fX_fY_fZ_f$) задает окружность радиусом $x_{fi} = d_{fi}/2$ на высоте z_i , смещенную относи-

тельно центра резьбы на величину эксцентриситета e . В системе координат резьбы $OXYZ$ координаты точек этой окружности определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{fi} \cos \alpha + e; \\ y_i &= x_{fi} \sin \alpha; \\ z_i &= z_{fi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Сечение Б-Б (см. рис. 3, а) проходит через точку i на окружности, соответствующей углу α . Расстояние от центра резьбы (точки O) до точки i на окружности соответствует размеру формообразуемого профиля резьбы x_j . Положение точки j относительно оси OX определим углом β с учетом шага резьбы P :

$$\begin{aligned} \beta &= \arctg \frac{y_i}{x_i}; \\ x_j &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2}; \\ z_j &= z_i + \frac{P}{2\pi} \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

При изменении угла α точка j перемещается, образуя кривую 4 (см. рис. 3, б, в).

Введем

$$t = \tg \beta = y_i / x_i.$$

Тогда с учетом выражений (1) получаем

$$x_{fi} \sin \alpha = t x_{fi} \cos \alpha + t e.$$

Принимая $q = \cos \alpha$, учитывая, что $\sin \alpha = \sqrt{1 - (\cos \alpha)^2}$ и решая квадратное уравнение относительно q , имеем

$$q = \frac{-et^2 \pm \sqrt{t^2(x_{fi}^2 - e^2) + x_{fi}^2}}{x_{fi}(1+t^2)}.$$

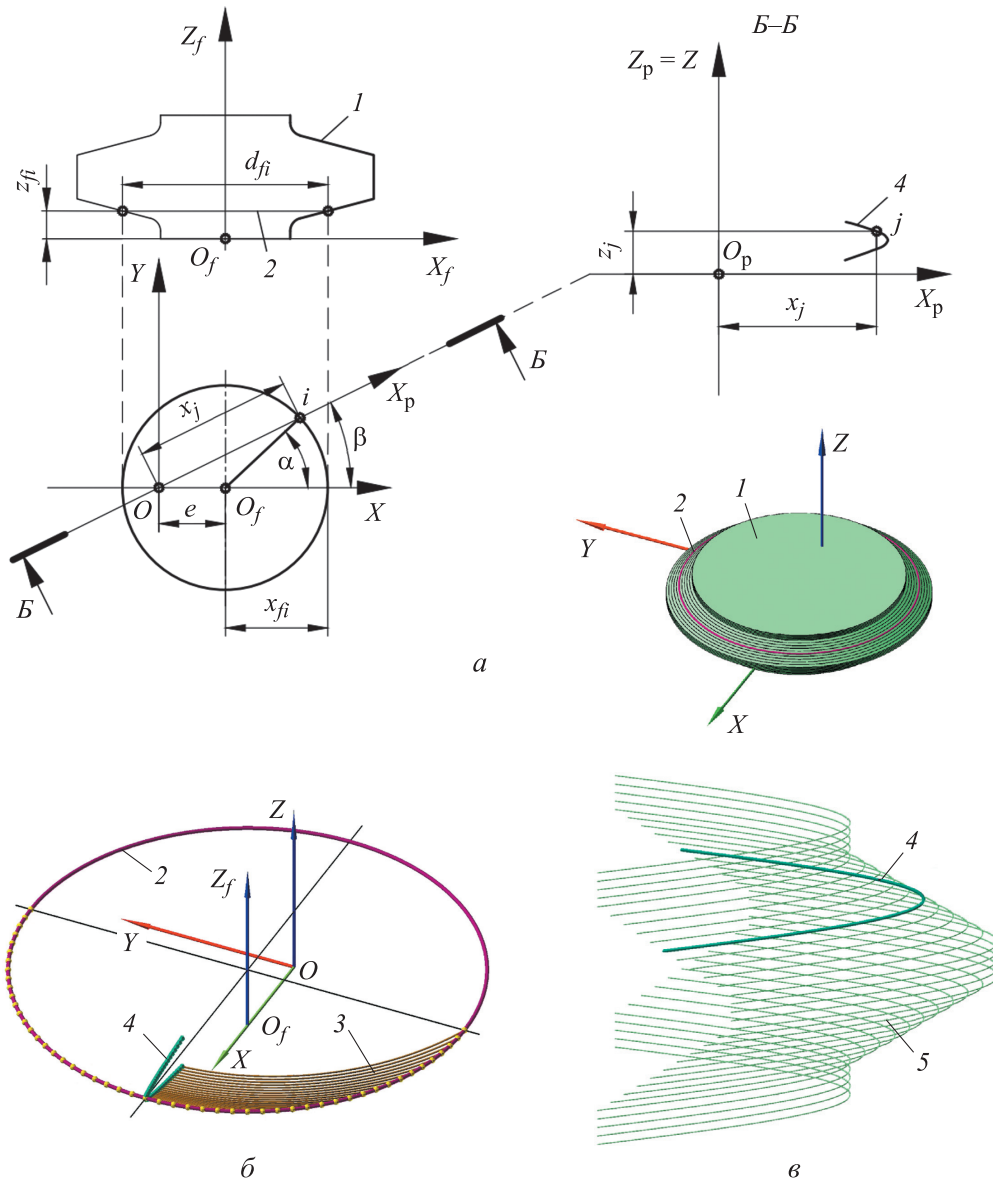


Рис. 3. Расчетная схема для определения границ формообразуемого резьбового профиля

Выбирая требуемый корень и подставляя его в выражение (2), получаем

$$x_j = \sqrt{x_{fi}^2 + \frac{e^2(1-t^2) + 2e\sqrt{t^2(x_{fi}^2 - e^2) + x_{fi}^2}}{1+t^2}},$$

где $t = \text{tg}[(z_j - z_{fi}) \cdot 2\pi / P]$.

Полученный новый профиль описывается координатами (x_j, z_j) на основе координат исходного элементарного диска (x_{fi}, z_{fi}) .

На рис. 4 приведена расчетная схема для определения геометрической погрешности профиля внутренней резьбы (на примере метрической резьбы), возникающей из-за несовпадения траектории движения зуба резьбовой фрезы и угла наклона резьбы, в результате чего

формируется резьба со средним диаметром D_2 большим, чем средний диаметр основного профиля резьбы D_{2p} (профиль ИИП принят идентичным основному профилю резьбы) [3, 4].

Геометрическую погрешность Δ_i , определяемую в радиальном направлении как расстояние между ИИП 4 диска инструмента 1 и профилем 3 внутренней резьбы 2 в одноименных точках А и Б, можно оценить по стандарту на резьбу для принятия решения о соответствии требуемой степени точности.

В общем случае геометрическая погрешность является переменной величиной вследствие криволинейности боковых сторон профиля резьбы и наличия переходной кривой между ними и впадиной.

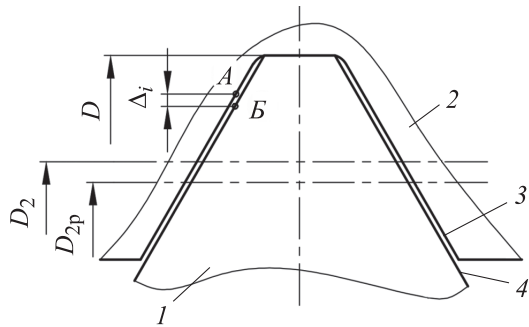


Рис. 4. Обобщенная схема для определения геометрической погрешности профиля резьбы

С помощью расчетной схемы, приведенной на рис. 4, и выражений (1), (2) разработана программа MThread, которая предлагает широкий спектр инструментов для исследования геометрии теоретического профиля, создаваемого при фрезеровании внутренней резьбы. В зависимости от выбранного режима можно получить информацию о параметрах, характеризующих точность резьбы любого профиля.

Программа позволяет профилировать ИИП, что существенно повышает точность изготавливаемого инструмента. Верификация программы осуществляется по результатам геометрической погрешности профиля метрических резьб, методика расчета которых приведена в работах [3, 4]. Совпадение значений с точностью до 0,1 мкм дает возможность утверждать, что результаты работы программы можно использовать для оценки точности резьб произвольного профиля.

Сравнительный анализ геометрической погрешности резьб различного профиля. С помощью программы MThread исследована геометрическая погрешность профиля резьбы и спрофилирована ИИП для формообразования внутренней резьбы принятой степени точности. Для сравнительного анализа выбраны четыре типа резьбы: метрическая, упорная, круглая и для соединения обсадных труб (см. таблицу).

Метрическая резьба является самой распространенной крепежной резьбой. Упорная резьба имеет несимметричный профиль с прямыми боковыми сторонами и малым углом (3°) одной из боковых сторон. Круглая резьба с углом профиля $15^\circ 56'$ выбрана из условия сочетания (в пределах профиля) малых углов боковых сторон и наличия больших радиусных участков. Резьба для соединения обсадных труб

по сравнению с круглой имеет несимметричный профиль с разными радиусами сопряжения прямолинейных участков.

Таким образом, сравнительный анализ указанных резьб позволяет исследовать влияние различных элементов профиля резьбы на формирование его геометрической погрешности.

На рис. 5 показаны профили формообразуемых резьб: метрической, упорной, круглой и для обсадных труб типа ВС. При разработке программы профиль инструмента принимался равным основному профилю формообразуемой резьбы, а угол уклона упорной трапецеидальной резьбы обсадных труб не учитывался.

На примере круглой резьбы показаны обозначения основного 1 и формообразуемого 2 профилей резьбы, опорных точек для расчета ее геометрической погрешности аналогично схеме, приведенной на рис. 4. Заштрихованная область соответствует внутренней резьбе, ограниченной формообразованным профилем.

Так как параметры указанных резьб не позволяют проводить сравнительный анализ при их одинаковых диаметрах и шагах, принято базовое соотношение $d_f/D_1 = 0,8$ (D_1 — внутренний диаметр резьбы). Для упорной резьбы коэффициент уменьшен до 0,7 из-за чрезмерно увеличенной (в несколько раз) геометрической погрешности профиля упорной резьбы по сравнению с круглой.

На рис. 6, а, в, д, ж приведены зависимости геометрической погрешности профиля Δ от диаметра D , шага P резьбы и диаметра инструмента d_f для резьб, изображенных на рис. 5. По горизонтальной оси показано изменение параметров D , P и d_f в пределах диапазона варьирования плана расчетного эксперимента. Для круглой (рис. 5, в) и упорной трапецеидальной (рис. 5, з) резьб отсутствуют зависимости $\Delta = f(P)$ ввиду использования только одного шага резьбы в рамках стандарта.

На рис. 6, б, г, е, з приведены зависимости геометрической погрешности профиля $\Delta = f(D, P, d_f)$ в пределах одного шага резьбы (шкалы по горизонтальной оси соответствуют таковым на рис. 5) для принятых значений параметров, которые позволяют оценить форму боковых сторон формообразованной резьбы и положение максимальной стрелы их прогиба.

Анализ результатов исследования, приведенных на рис. 5 и 6, позволяет заключить следующее:

- указанные резьбы можно ранжировать по значению геометрической погрешности Δ в порядке ее увеличения: метрическая, упорная трапецеидальная, круглая, упорная; несмотря на схожие углы наклона боковой стороны резьбы (3°) из-за большего отношения P/D упорная резьба имеет существенно большее значение Δ ;

- с уменьшением угла наклона боковой стороны резьбы погрешность Δ увеличивается тем сильнее, чем ближе резьба приближается к прямоугольной, что подтверждают результаты исследования [4]; лимитирующей по значению Δ является боковая сторона резьбы с меньшим углом ее наклона;

- использование кинематической схемы с параллельными осями резьбы и инструмента позволяет формообразовать соответственно принятой степени точности только метрическую резьбу, остальные рассмотренные резьбы трудно или невозможно получить с помощью

указанной схемы; для обеспечения возможности образования этих резьб следует уменьшать диаметр инструмента;

- при создании всех резьб получаемый профиль имеет криволинейные боковые стороны, которые являются огибающими семейства кривых положений инструмента; оценка стрелы прогиба боковых сторон по разработанной программе показала результаты: метрическая резьба — 0,11 мкм, упорная (на стороне с углом 3°) — 525 мкм, круглая (вдоль кривой, образованной прямым участком) — 31 мкм, упорная трапецеидальная — 192 мкм (сторона с углом 3°) и 27 мкм (сторона с углом 10°); для всех резьб максимальное значение стрелы прогиба находится приблизительно посередине измеряемого участка, который для метрической, упорной и упорной трапецеидальной резьб определяется от вершины резьбы до точки максимальной разбивки, для круглой — по прямойлинейному формообразующему участку;

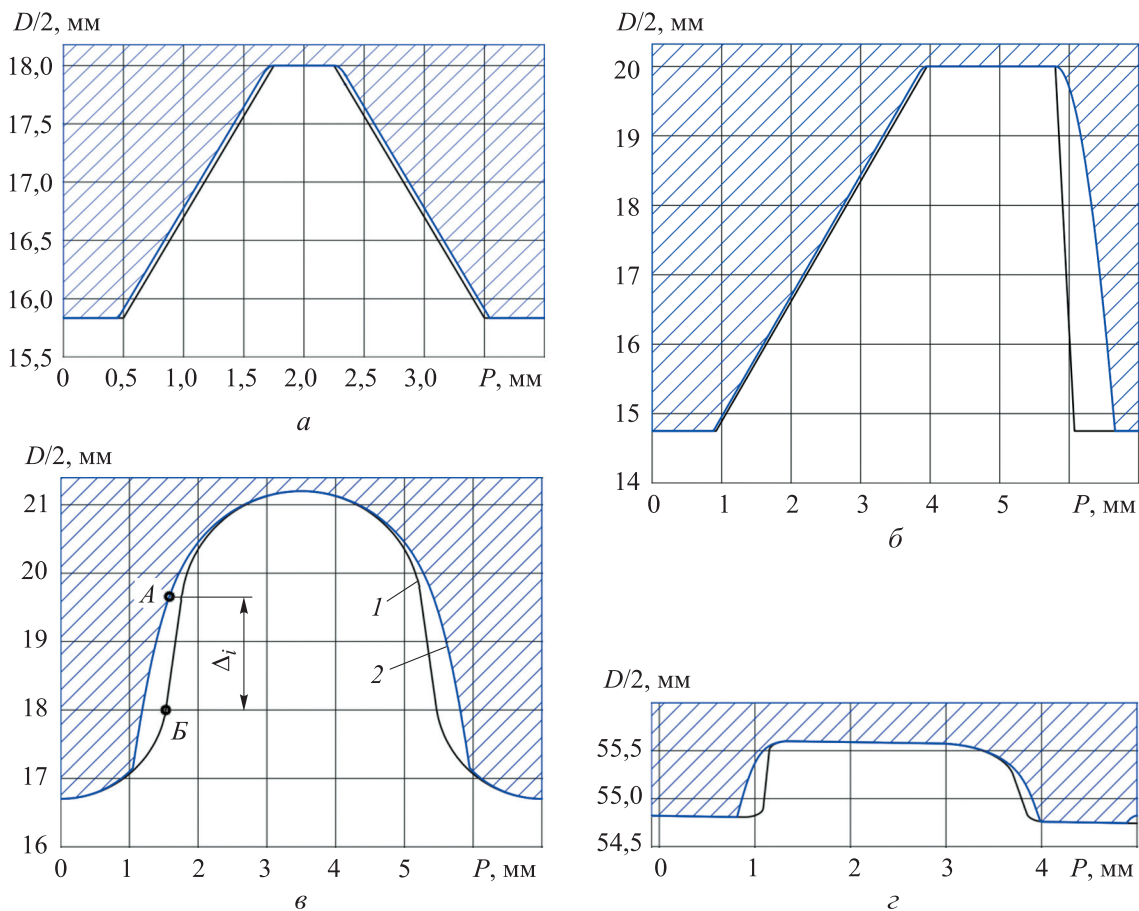


Рис. 5. Профили формообразуемых резьб:
 а — метрической (ГОСТ 9150–2002), $D = 36$ мм, $P = 4$ мм, $d_f = 0,8D_1$;
 б — упорной (ГОСТ 10177–82), $D = 40$ мм, $P = 7$ мм, $d_f = 0,7D_1$;
 в — круглой (DIN 262), $D = 42,4$ мм, $P = 7$ мм, $d_f = 0,8D_1$;
 з — упорной трапецеидальной ВС (ГОСТ 34057–2017), $D = 114,3$ мм, $P = 5,08$ мм, $d_f = 0,8D_1$

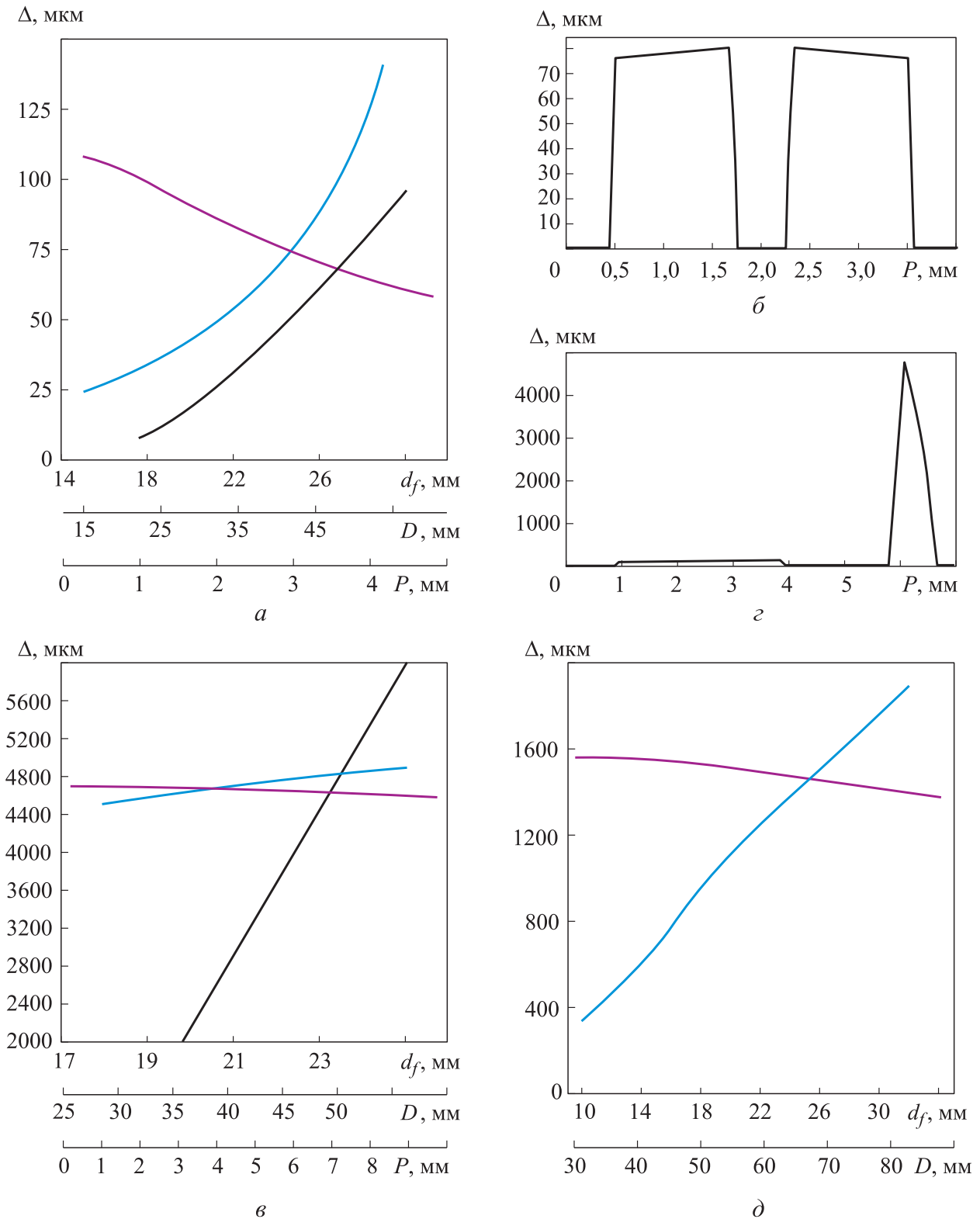


Рис. 6 (начало). Зависимости геометрической погрешности профиля Δ от диаметра инструмента d_f (—), диаметра D (—) и шага P (—) резьбы различного профиля:
 а, б — метрической (ГОСТ 9150–2002), $D = 36$ мм, $P = 4$ мм, $d_f = 0,8D_1$;
 в, г — упорной (ГОСТ 10177–82), $D = 40$ мм, $P = 7$ мм, $d_f = 0,7D_1$;
 д — круглой (DIN 262), $D = 42,4$ мм, $P = 7$ мм, $d_f = 0,8D_1$;

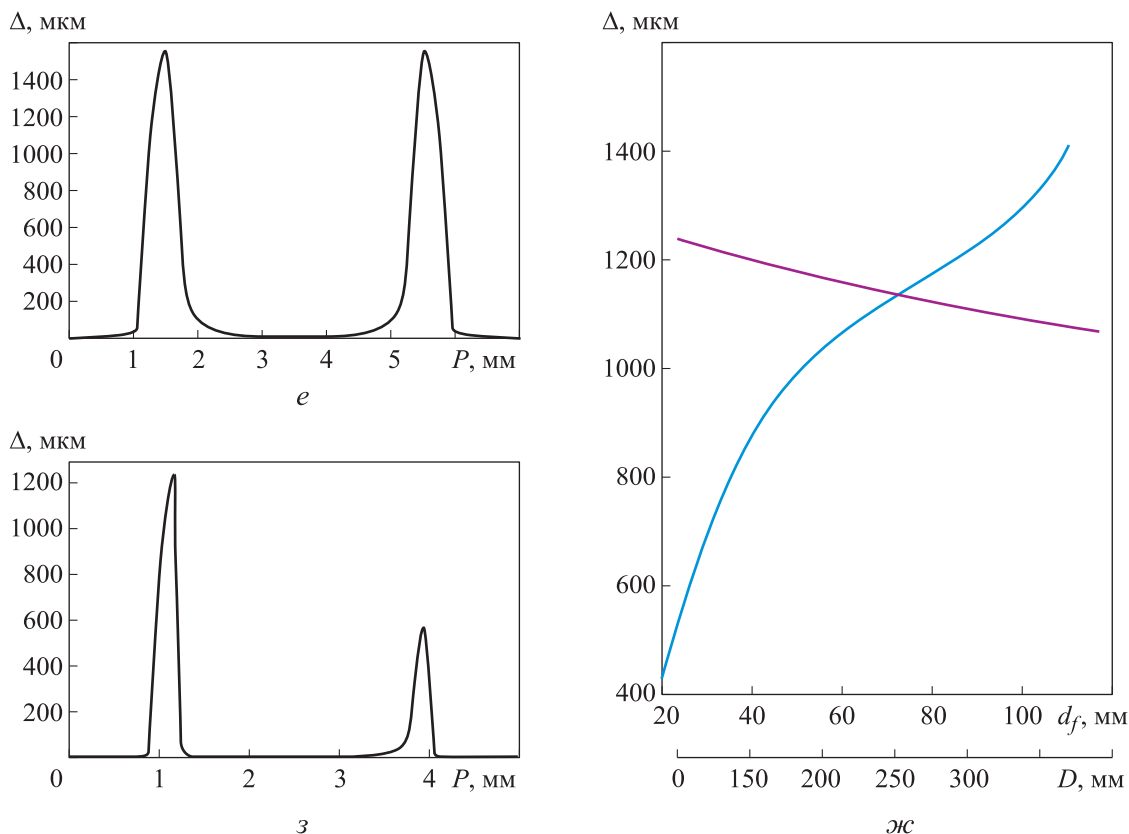


Рис. 6 (окончание). Зависимости геометрической погрешности профиля Δ от диаметра инструмента d_f (—), диаметра D (—) и шага P (—) резьбы различного профиля:
 e — круглой (DIN 262), $D = 42,4$ мм, $P = 7$ мм, $d_f = 0,8D_1$;
 $ж, з$ — упорной трапецеидальной ВС (ГОСТ 34057–2017), $D = 114,3$ мм, $P = 5,08$ мм, $d_f = 0,8D_1$

- при создании метрической резьбы вершина зуба инструмента формирует впадину с закруглениями по бокам, а боковые стороны — боковые стороны профиля резьбы; в случае с остальными резьбами профиль предположительно образуют вершины профиля зуба, что дает увеличенные прогибы боковых сторон;

- во всех случаях погрешность Δ растет при увеличении шага резьбы и диаметра инструмента и уменьшается с ростом диаметра резьбы (при принятом значении d_f/D_1).

Выводы

1. Предложенная расчетная схема для определения профиля резьбы с использованием ки-

нематической схемы, где оси резьбы и инструмента расположены параллельно, позволила разработать программу для численного расчета точек профиля различных резьб и выполнить сравнительную оценку их точности.

2. Расчеты показали, что с точки зрения требуемой точности кинематическая схема фрезерования обеспечивает удовлетворительную обработку метрических резьб, однако не позволяет или существенно ограничивает возможность обработать резьбы с малым углом наклона боковой стороны, что требует дальнейшей модернизации кинематической схемы для расширения возможностей резьбофрезерования.

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] Древалъ А.Е., Мальков О.В., Литвиненко А.В. Точность обработки внутренних резьб комбинированным инструментом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 12, с. 44–52, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-44-52>
- [4] Malkov O.V., Malkova L.D. Improving thread accuracy in machining components for rocket and space technologies. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2171, art. 200006, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133364>
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] Lee S.W., Nestler A. Simulation-aided design of thread milling cutter. *Procedia CIRP*, 2012, no. 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. Tech.*, 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. Tech.*, 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. *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. Aug.*, 2011, vol. 133, no. 4, art. 041014, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4004318>
- [14] Gao H., Lu S., Yang A. et al. A methodology for helical mill-grinding of tiny internal threads made of hard brittle materials. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2017, vol. 91, no. 1, pp. 25–37, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9727-5>

References

- [1] Mal'kov 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] Mal'kov 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] Dreval' A.E., Mal'kov O.V., Litvinenko A. Accuracy of machining internal threads with a combined tool. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2011, no. 12, pp. 44–52, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-44-52> (in Russ.).
- [4] Malkov O.V., Malkova L.D. Improving thread accuracy in machining components for rocket and space technologies. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2171, art. 200006, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133364>
- [5] 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>
- [6] 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>

- [7] Lee S.W., Nestler A. Simulation-aided design of thread milling cutter. *Procedia CIRP*, 2012, no. 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. Tech.*, 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. Tech.*, 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. *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 assessment of initial tool surface at the processing of female thread. *Vestnik MGTU Stankin [Vestnik MSTU 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. Aug.*, 2011, vol. 133, no. 4, art. 041014, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4004318>
- [14] Gao H., Lu S., Yang A. et al. A methodology for helical mill-grinding of tiny internal threads made of hard brittle materials. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2017, vol. 91, no. 1, pp. 25–37, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9727-5>

Статья поступила в редакцию 08.02.2022

Информация об авторах

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, к. 1, e-mail: malkov@bmstu.ru).

ПАНДУРОВ Михаил Алексеевич — учебный мастер лаборатории кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: pandurovma@student.bmstu.ru).

Information about the authors

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

PANDUROV Mikhail Alekseevich — Educational Master, Laboratory of the Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pandurovma@student.bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мальков О.В., Пандуров М.А. Сравнительный анализ точности фрезерования резьб с различным профилем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 3–15, doi: [10.18698/0536-1044-2022-7-3-15](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-3-15)

Please cite this article in English as:

Malkov O.V., Pandurov M.A. Comparative Analysis of the Accuracy of Milling Threads with Various Profiles. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 3–15, doi: [10.18698/0536-1044-2022-7-3-15](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-3-15)