

УДК 621.99

doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-21-32

Анализ технологической и кинематической возможностей формообразования упорной резьбы фрезой общего положения

О.В. Мальков, И.Д. Лагойский

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Analysis of the Technological and Kinematic Possibility in Shaping Buttress Thread with the General Position Cutter

O.V. Malkov, I.D. Lagoysky

Bauman Moscow State Technical University

Предложены новые кинематические схемы формообразования наружной и внутренней упорных резьб фрезерованием однодисковым инструментом по схеме со скрещивающимися осями резьбы и фрезы общего положения с использованием двух углов ее поворота. Установлена область типоразмеров упорных резьб, для которых существует технологическая возможность фрезерования с применением предложенных кинематических схем одним типоразмером инструментом. Проведено исследование точности упорной резьбы по ГОСТ 10177–82 на основе геометрического моделирования кинематики ее формообразования. Определены значения максимальной геометрической погрешности и погрешности по среднему диаметру в зависимости от углов поворота и геометрических параметров инструмента. Для принятых типоразмеров упорных резьб найдены значения углов поворота оси вращения фрезы и параметры ее рабочей части, позволяющие формообразовать резьбу со степенью точности, соответствующей ГОСТ 25096–82.

Ключевые слова: упорная резьба, резьбофрезерование, формообразование резьбы, точность резьбы, моделирование резьбообразования

The paper proposes new kinematic methods in shaping external and internal buttress thread by milling with a single-disk tool according to the scheme with crossing axes of the thread and the general position tool using two angles of its rotation. The range of the thrust threads standard sizes was established, which implied technological possibility of milling using the proposed kinematic methods with one tool standard size. Accuracy of the buttress thread according to GOST 10177-82 was studied on the basis of geometric simulation of shaping kinematics, and values of the maximum geometric error and the error in the average diameter were determined depending on the tool rotation angles and geometric parameters. For the accepted standard sizes of the buttress threads, values of rotation angles of the thread cutter rotation axis and parameters of its working part were found, which makes it possible to shape the thread with a degree of accuracy corresponding to GOST 25096–82.

Keywords: buttress thread, thread milling, thread shaping, thread accuracy, thread simulation

Резьбофрезерование получает все большее распространение среди способов изготовления резьбы [1–15]. Это связано с широким использованием оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) и такими достоинствами процесса, как:

- универсальность — способность обработки одним режущим инструментом (далее инструмент) глухих и сквозных отверстий с правой, левой, одно- и многозаходной резьбами с одинаковым шагом, а в отдельных случаях возможность одновременной обработки внутренней и наружной резьбы;

- надежность — мелкая стружка избавляет от необходимости ее удаления, способствует снижению силы резания и вибраций, что особенно критично при выполнении резьбы большого диаметра и в труднообрабатываемых материалах; возможность корректировки положения инструмента для достижения принятой степени точности; легкое извлечение сломанного инструмента из отверстия;

- хорошие эксплуатационные показатели — фрезерование резьбы (включая тонкостенные и асимметричные детали) полного профиля без сбегания в большинстве материалов, в том числе в термообработанных (≤ 60 HRC); комбинирование в пределах одной конструкции различных инструментов с резьбовой фрезой повышает точность и эффективность обработки; частота вращения инструмента кинематически не связана с обеспечением шага резьбы, что позволяет назначать необходимую скорость главного движения резания; возможность использования стандартных вспомогательных инструментов; отсутствие реверса шпинделя на рабочем ходу, что снижает вспомогательное время обработки.

Перечисленные достоинства резьбофрезерования позволяют повысить эффективность обработки резьбы, а также уменьшить номенклатуру применяемых инструментов, инструментальных наладок и количество позиций в магазинах станков с ЧПУ.

Как показал анализ каталогов производителей, резьбовые фрезы в основном предназначены для нарезания метрической, дюймовой, цилиндрической, конической трубной и трапецидальной (в ходовых винтах, зажимных элементах) резьб, для выполнения резьбы в стальных панцирных трубах (электротехнических изделий) и в очень ограниченном объеме для изготовления упорной резьбы (УР).

Последнюю обычно нарезают в деталях, испытывающих большую осевую нагрузку, а также в изделиях нефтегазодобычи (обсадных трубах и их муфтах), насосно-компрессорного оборудования (насосно-компрессорных трубах и их муфтах, блоках клапанов плунжерных насосов), медицинской техники (винтах для остеосинтеза), в прессах и домкратах.

Резьбофрезерование эффективно применяют в корпусных деталях, не являющихся телами вращения, поэтому в качестве объекта исследования выбрана гидравлическая часть корпуса плунжерного насоса высокого давления, где для его соединения с гайками (уплотнительными, датчика и крышки) нарезана УР [1].

Типы УР, получаемых фрезерованием, приведены в табл. 1, где введены следующие обозначения производителей резьбовых фрез: CA — Carmex Precision Tools Ltd.; I — ISCAR LTD; V — Vargus Ltd., S — SECO TOOLS AB; AT — Advent Tool & Manufacturing Inc.; E — Emuge Corporation. Обозначения углов наклона боковых сторон резьбы γ и β соответствуют ГОСТ 11708–82.

Из табл. 1 следует, что УР выполняют резьбофрезерованием только с углами профиля $\gamma = 7^\circ$ и $\beta = 45^\circ$ (например, American buttress). Это связано с геометрической погрешностью, присущей обработке по кинематической схеме с параллельными осями резьбы и инструмента, когда вследствие несовпадения траектории движения зубьев резьбовой фрезы и направления винтовой линии формообразуемой резьбы возникает геометрическая погрешность ее профиля, что в ряде случаев приводит к несоответствию УР принятой степени точности [9, 10]. Для пластмассовых емкостей с резьбой KS не рассматривали УР, так как ее получают литьем.

В работе [9] решена задача профилирования зубьев резьбовой фрезы для формообразования УР принятой степени точности. Так как расчеты выполнены для минимального угла наклона боковой стороны резьбы, равного 10° , можно провести профилирование инструмента для изготовления УР.

В публикации [10] показано, что при уменьшении угла наклона боковой стороны резьбы с 20 до 10° геометрическая погрешность увеличивается до 8 раз, что может превысить поле допуска на ее средний диаметр. Следует ожидать, что уменьшение угла наклона боковой стороны резьбы до 3° не позволит ее формооб-

Таблица 1

Типы УР, обрабатываемых фрезерованием

Обозначение резьбы	Код обозначения производителя						Угол наклона боковой стороны УР		Пример стандарта	Область применения
	CA	I	V	S	AT	E	γ	β		
S							3	30	ГОСТ 10177–82, DIN 513-1	Детали, испытывающие одностороннюю осевую нагрузку
	–	–	–	–	–	–	3	45	ГОСТ 13535–87	Детали, подвергающиеся большой знакопеременной нагрузке
	+	+	+	+	+	+	7	45	ANSI/ASME B1.9	Обсадные трубы и плунжерные насосы
	–	–	–	–	–	–	0	45	DIN 2781	Гидравлические прессы
KS	–	–	–	–	–	–	10	40	DIN 6063.1	Пластмассовые емкости
	–	–	–	–	–	–	10	10	DIN 6063.2	

Примечание. Знаком «+» обозначено наличие у производителя инструмента, предназначенного для изготовления указанной УР, а знаком «–» — ее отсутствие.

разовать. Это косвенно подтверждено отсутствием подобных резьбовых фрез в каталогах производителей (см. табл. 1).

Таким образом, расширение области резьб, обрабатываемых фрезерованием, позволит максимально эффективно использовать указанные достоинства процесса при нарезании УР с углом боковой стороны $\gamma = 3^\circ$.

Цель работы — исследование технологической и кинематической возможностей геометрического формообразования внутренней УР по ГОСТ 10177–82 с применением новых кинематических схем со скрещивающимися осями резьбы и инструмента — резьбовой фрезы общего положения (далее ФОП).

Новые кинематические схемы формообразования УР. В общем случае использование кинематической схемы с параллельными осями резьбы и инструмента позволяет применять более простое оборудование с ЧПУ с меньшим числом координат без приводных приспособлений. Однако это приводит к появлению геометрической погрешности профиля резьбы вследствие несовпадения траектории движения зубьев ФОП и направления винтовой линии резьбы [10].

Для метрических резьб среднего класса точности использование подобной кинематической схемы позволяет обрабатывать их в пределах требуемых полей допусков благодаря большому углу наклона боковых сторон (30°). Для

УР с углом наклона боковой стороны $\gamma = 3^\circ$ применение указанной кинематической схемы приводит к существенным ограничениям формообразования, а в большинстве случаев к невозможности ее изготовления [9, 11].

Предложены новые схемы формообразования УР с малыми углами боковых сторон, которые существенно расширяют их область использования в резьбофрезеровании [16]. Подобные схемы также можно задействовать для накатывания, шлифования и электрофизических способов обработки.

Поэтому для исследования выберем инструмент в виде диска без конструктивных элементов (зубьев и стружечных канавок), а под формообразованием резьбы будем понимать ее фрезерование. Рассмотрим однодисковый инструмент, что является достаточным для изучения вопросов профилирования, но он может быть и многодисковым (цилиндрическим или коническим).

Под ФОП будем понимать инструмент, для которого главное движение резания (вращательное) осуществляется относительно оси, являющейся прямой общего положения по отношению к плоскостям проекций в станочной системе координат.

Новые кинематические схемы формообразования наружной и внутренней цилиндрических резьб однодисковой ФОП по схеме со скрещивающимися осями инструмента и УР приведены на рис. 1.

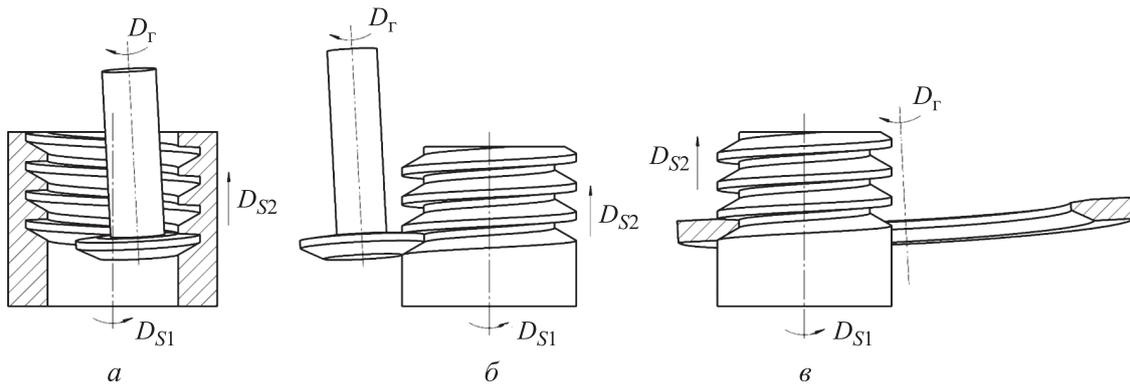


Рис. 1. Кинематические схемы формообразования резьб однодисковой ФОП по схеме со скрещивающимися осями инструмента и УР:
а и б — для внутренней и наружной УР соответственно; в — для наружной УР охватывающим инструментом

Согласно этим схемам, ФОП вращается вокруг собственной оси общего положения (движение D_r). Также происходит относительное планетарное движение ФОП и заготовки вследствие придания последней движения вращения вокруг своей оси (движения окружной подачи D_{S1}) и прямолинейного движения заготовки вдоль своей оси (движения осевой подачи D_{S2}). Число планетарных оборотов равно требуемому числу витков резьбы, а движения подачи D_{S1} и D_{S2} кинематически связаны между собой для получения требуемой пространственной винтовой линии.

В результате использования кинематической схемы формообразования внутренней УР (см. рис. 1, а) получаем обобщенное расположение ФОП относительно УР, изображенное на рис. 2 (хвостовик однодискового инструмента не показан). Его можно описать двумя поворотами системы координат ФОП $O_t x_t y_t z_t$ относительно системы координат заготовки $O x y z$: на угол φ_x вокруг оси Ox (в направлении угла наклона

винтовой линии УР) и на угол φ_y вокруг оси Oy (по профилю УР в сторону боковой стороны с большим углом). Повороты могут выполняться в обратной последовательности: сначала на угол φ_y вокруг оси Oy , затем на угол φ_x вокруг оси Ox [16].

Достоинством описанного подхода задания взаимного расположения ФОП и УР является отсутствие необходимости привязки к кинематике конкретного станка с ЧПУ при возможности расчета в системах координат, не связанных с оборудованием. Окончательные параметры расположения задаются для конкретного типа оборудования в зависимости от возможностей станка, но при этом эквивалентно требуемому расчетному взаимному расположению ФОП и заготовки [16].

Анализ технологической возможности формообразования УР. Под технологической возможностью формообразования УР по ГОСТ 10177–82 (с углами наклона боковых сторон $\gamma = 3^\circ$ и $\beta = 10^\circ$) будем понимать следующие условия:

- использование конструкции ФОП с отношением максимального диаметра формообразующей части к диаметру крепежной части (хвостовика), обеспечивающей прочность ФОП при возможности ее свободного ввода в предварительно подготовленное отверстие для формообразования УР; это условие обусловлено большой высотой профиля УР, связанной с крупным шагом, в результате чего требуемый внутренний диаметр резьбы может не обеспечить достаточный диаметр хвостовика для размещения инструмента в отверстии;

- применение технологичного профиля формообразующей части ФОП, ограниченного от-

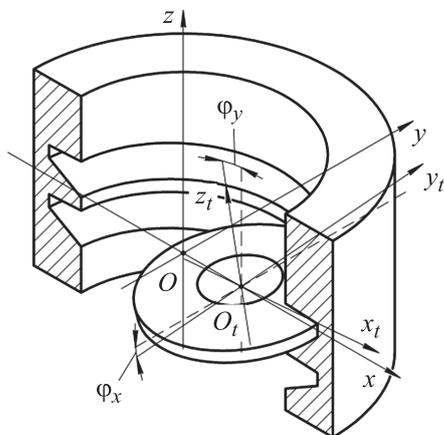


Рис. 2. Схема обобщенного расположения ФОП относительно УР

резками прямых на боковых сторонах и вершине, который позволит использовать один типоразмер однодискового инструмента для изготовления нескольких типоразмеров резьб при варьировании диаметра и шага резьбы в пределах возможностей резьбообразующего профиля ФОП; это условие связано с необходимостью разработки универсального инструмента, предназначенного для изготовления целой гаммы резьб, что существенно расширит возможности обработки; в противном случае будем получать ФОП с нетехнологичным профилем, ограниченным тремя кривыми и пригодным для обработки резьбы одного типоразмера, что существенно сужает возможности резьбофрезерования УР.

Схемы расчета радиального зазора между ФОП и резьбовым отверстием (далее радиальный зазор) Δ при радиальном и осевом внедрении ФОП в заготовку приведены на рис. 3. Предварительно подготовленное гладкое отверстие и кинематические движения на рис. 3 не показаны.

При радиальном внедрении в заготовку ФОП должна быть предварительно свободно введена в отверстие с обеспечением радиального зазора Δ . При осевом внедрении в заготовку ФОП вводят извне в зону формообразования по винтовой траектории с эксцентриситетом, необходимым для выполнения УР требуемого диаметра. Поэтому для размещения ФОП используют большее пространство, что позволяет выбрать данную схему формообразования при невозможности размещения инструмента для его радиального внедрения в заготовку.

Расчетные схемы носят упрощенный характер, при котором не учтен поворот ФОП на углы φ_x и φ_y , что связано с использованием однодискового инструмента, формообразованием только одного витка резьбы и относительно небольших углов поворота. Также принято, что высоты формообразующего профиля ФОП и профиля УР равны.

Таким образом, расчет радиального зазора будет являться приближенным и в дальнейшем его можно уточнить для конкретного сочетания УР и ФОП. При использовании гребенчатого многодискового инструмента следует учитывать углы поворота, так как при большой длине УР она может пересечься с хвостовиком.

Для оценки первого условия технологической возможности формообразования УР про-

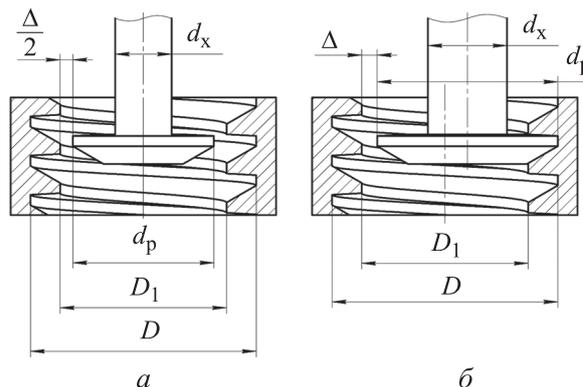


Рис. 3. Схемы расчета радиального зазора Δ при радиальном (а) и осевом (б) внедрении ФОП в заготовку

ведем анализ параметров конструкций ФОП, указанных в табл. 1, согласно которой фрезерованием обрабатывают только УР с углами профиля 7 и 45°. Значения параметров ФОП, взятые из каталогов компаний-производителей Vargus Ltd. и Advent Tool & Manufacturing Inc., приведены в табл. 2. Здесь D — номинальный диаметр УР; P — шаг резьбы — число ниток на дюйм (TPI); d_x и d_p — диаметры хвостовика и резьбообразующей части ФОП; k — коэффициент, учитывающий высоту профиля УР и требуемый диаметр хвостовика для обеспечения прочности ФОП, $k = d_x/d_p$.

Как следует из табл. 2, коэффициент $k = 0,350...0,824$. Его меньшее значение, принадлежащее ФОП производства компании Advent Tool & Manufacturing Inc., соответствует большему диаметру ФОП и означает, что при диаметре $d_p > 100$ мм можно использовать меньший диаметр хвостовика с учетом достаточной прочности инструмента.

Проведем анализ первого условия технологической возможности обработки УР согласно ГОСТ 10177-82 с использованием полученного диапазона коэффициента k . Для этого рассчитаем зависимость радиального зазора от геометрических параметров формообразуемой УР и ФОП при радиальном (рис. 3, а) и осевом (рис. 3, б) внедрении инструмента в заготовку.

Диаметр ФОП

$$d_p = D - D_1 + d_x = D - D_1 + k d_p, \quad (1)$$

где D_1 — внутренний диаметр УР.

При радиальном внедрении ФОП в заготовку радиальный зазор

$$\Delta = D_1 - d_p. \quad (2)$$

Таблица 2

Значения параметров ФОП

Компания-производитель	Тип конструкции ФОП	D , дюймы	P , TPI	d_p , мм	d_x , мм	k
Vargus Ltd.	Сборная однодисковая	1,75...6,00	6,0	26,40	20,10	0,761
		2,50...6,00	6,0	35,50	28,00	0,789
		5,50...24,00	4,0	88,00	72,50	0,824
		6,00...24,00	3,0	88,00	72,50	0,824
		7,00...24,00	2,5	88,00	72,50	0,824
Advent Tool & Manufacturing Inc.	Сборная гребенчатая	1,50...24,00	20,0...6,0	29,62	22,23	0,750
				34,95	25,40	0,730
				35,97	25,40	0,700
				42,32	31,75	0,750
				48,87	31,75	0,640
				58,83	31,75	0,540
				71,53	38,10	0,530
				84,23	38,10	0,450
				96,93	50,80	0,520
				122,33	50,80	0,410
147,09	50,80	0,350				

При осевом внедрении ФОП в заготовку радиальный зазор

$$\Delta = D - \frac{D - D_1}{2} - d_p. \quad (3)$$

Выражая из формулы (1) диаметр d_p и подставляя его в формулы (2) и (3), получаем соотношения для определения радиального зазора:

- при радиальном внедрении ФОП в заготовку

$$\Delta = \frac{(2-k)D_1 - D}{1-k};$$

- при осевом внедрении ФОП в заготовку

$$\Delta = \frac{(3-k)D_1 - (1+k)D}{2(1-k)}.$$

Влияние номинального диаметра УР (в интервале 22...60 мм с шагом $P = 8$ мм) и шага (в интервале 3...14 мм при диаметре $D = 60$ мм) для УР (по ГОСТ 10177-82) на радиальный зазор при радиальном и осевом внедрении ФОП в заготовку показано на рис. 4. Очевидно, что наибольшие трудности возникают при формообразовании УР с максимальным отношением шага к номинальному диаметру $u = P/D$, к которой относится резьба S22·8 ($u = 0,36$).

Однако, согласно рис. 4, резьбу S22·8 невозможно формообразовать никаким из способов внедрения ФОП, так как радиальный зазор Δ является отрицательным. Поэтому для дальнейших исследований выбраны УР с обеспечением технологической возможности формообразования (табл. 3).

Анализ графиков, приведенных на рис. 4, выявил следующее:

- для части УР отсутствует технологическая возможность их резьбофрезерования, так как радиальный зазор является отрицательным;
- уменьшение коэффициента k (в пределах, принятых производителями ФОП) расширяет диапазон УР, технологически возможных для обработки;
- использование осевого внедрения ФОП в заготовку вместо радиального расширяет диапазон УР, технологически возможных для обработки;
- в общем случае технологическая возможность формообразования УР повышается при уменьшении коэффициентов u и k .

Исследование точности УР на основе кинематики ее формообразования. Анализ технологической возможности фрезерования УР поз-

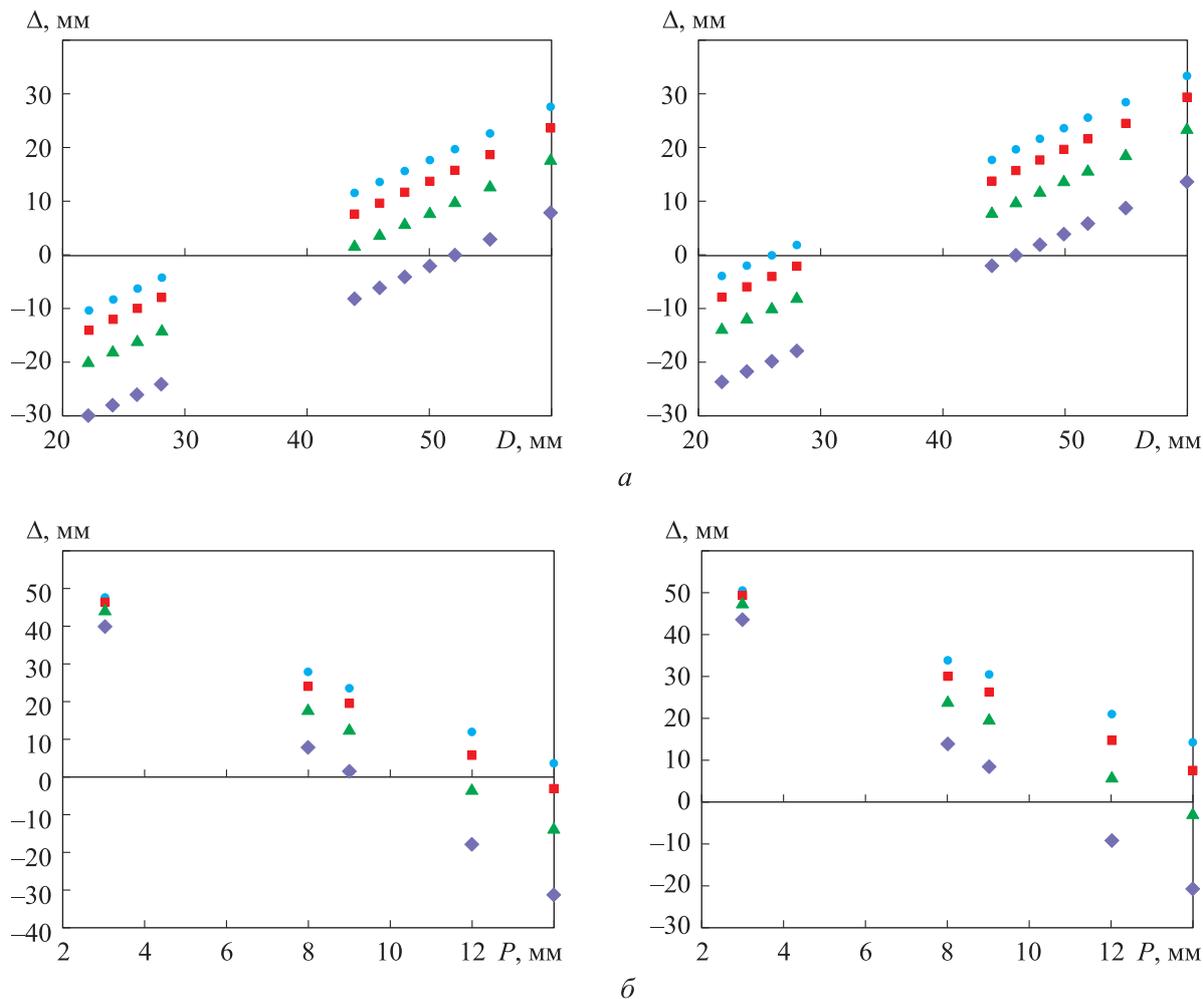


Рис. 4. Влияние параметров УР на радиальный зазор Δ при радиальном (слева) и осевом (справа) внедрении ФОП в заготовку и коэффициенте $k = 0,4$ (\bullet), $0,5$ (\blacksquare), $0,6$ (\blacktriangle) и $0,7$ (\blacklozenge):
 а — номинального диаметра D для шага $P = 8$ мм; б — шага P для $D = 60$ мм

волил установить ее типоразмеры для дальнейшего исследования точности формообразования на основе геометрического моделирования в программном комплексе Autodesk Inventor 2020 (студенческой версии).

Параметры моделирования резбозерезования заготовки приведены на рис. 5. В качестве ФОП выбран единичный диск 5 (рис. 5, а, хвостовик не показан), профиль которого задан параметрами, указанными на рис. 5, в, и создается посредством пересечения заготовки 3, имеющей требуемый резьбовой профиль, и плоскости 2, расположенной под углом φ_x к осевой плоскости 1.

Полученный таким способом профиль состоял из трех кривых, которые в дальнейшем заменяли прямыми с целью повышения технологичности, и определялся углами наклона бо-

ковых сторон профиля γ_p и β_p , углом наклона ϵ_p и длиной вершины a . В случае моделирования универсального инструмента его геометрические параметры устанавливали для резьбы наименьшего диаметра, как представляющего наибольшую сложности при формообразовании, а при моделировании больших диаметров (с постоянным шагом резьбы), использовали такой же инструмент.

Диаметр единичного диска выбирали как максимально возможный для размещения в отверстии исходя из внутреннего диаметра резьбы D_1 . Поверхность ФОП представляла собой исходную инструментальную поверхность (ИИП). Профиль ФОП задавался в плоскости 2 (см. рис. 5, а), повернутой на угол φ_x , а угол φ_y обеспечивался поворотом оси инструмента на требуемый угол в данной плоскости.

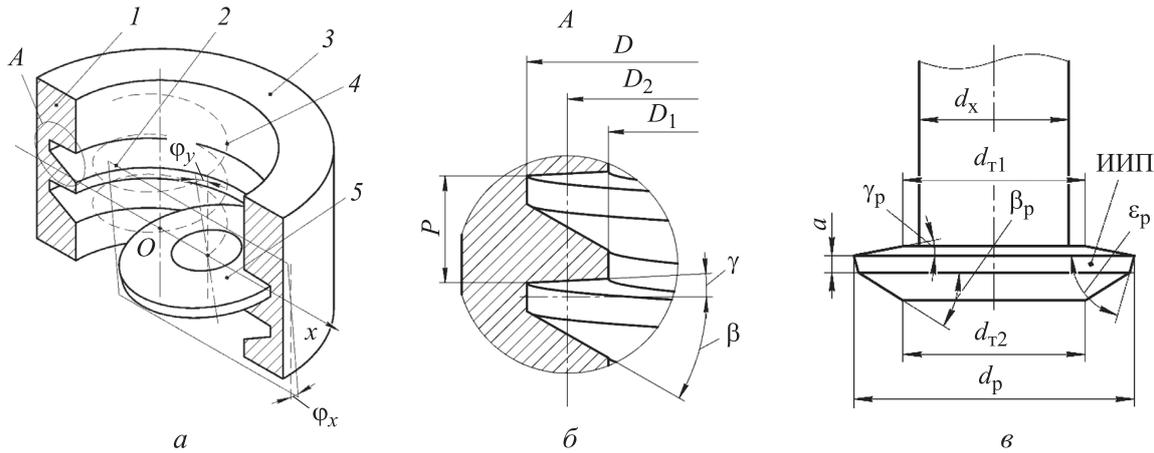


Рис. 5. Параметры моделирования резбозерезования заготовки:
 а — параметры относительного положения инструмента и заготовки;
 б — параметры УР; в — параметры ФОП

После поворотов на углы φ_x и φ_y создавался массив дисков вдоль винтовой линии 4, представляющей собой траекторию движения ФОП. С помощью операции вычитания массива дисков из заготовки с требуемой резьбой и выполнения осевых сечений полученной детали строился фактический резьбовой профиль, формирующийся при заданных параметрах моделирования.

В результате определялись основной и формообразованный резьбовые профили (рис. 6). Для оценки геометрической погрешности профиля использовали два параметра: наибольшую геометрическую погрешность $\Delta\rho_{\max}$ и геометрическую погрешность по среднему диаметру D_2 ,

$$\Delta\rho_{D_2} = (D_2 - D_{2\phi})/2,$$

где $D_{2\phi}$ — фактический средний диаметр резьбы, установленный в результате геометрического моделирования.

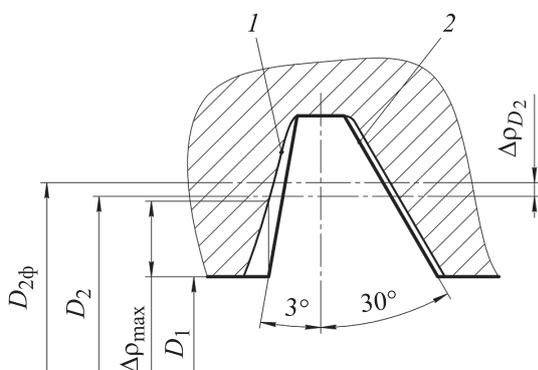


Рис. 6. Схема определения параметров формообразованного 1 и основного 2 профилей резьбы

Наибольшую геометрическую погрешность $\Delta\rho_{\max}$ определяли как разницу между формообразованным и основным профилями в радиальном направлении, рассматривая на обеих сторонах профиля. Однако все максимальные значения $\Delta\rho_{\max}$ оказались на стороне профиля с углом 3° , что является следствием малых значений φ_y .

Результаты моделирования УР (ГОСТ 10177–82), соответствующие технологической возможности ее формообразования для принятых значений коэффициента k (см. рис. 4), приведены в табл. 3. Геометрические погрешности профиля полученной резьбы $\Delta\rho_{\max}$ и $\Delta\rho_{D_2}$ сравнивали с полем допуска для степени точности, установленной ГОСТ 25096–82. В табл. 3 также указаны углы поворота φ_x и φ_y относительного взаимного положения резьбы и диска (см. рис. 2) и принятые параметры инструмента (см. рис. 5, в).

При моделировании принято упрощение инструмента, в котором диаметр его торца $d_t = d_{r1} = d_{r2} = d_x$, где d_{r1} и d_{r2} — диаметры первого и второго торцов ФОП. Чтобы проверить возможность использования универсального инструмента для различных резьб, проводили моделирование при постоянных шаге и номинальном диаметре УР (см. табл. 3). Также получены результаты моделирования при использовании специального инструмента для каждого типоразмера резьбы. Для специальной ФОП параметры профиля подбирали из условия получения минимального значения $\Delta\rho_{\max}$, а диаметр d_p выбирали для каждого конкретного случая как максимально возможный.

Таблица 3

**Значения геометрических погрешностей формообразования УР при ее постоянных шаге
и номинальном диаметре**

Резьба	Углы поворота, град		Параметры инструмента						$\Delta\rho_{\max}$, мм	$\Delta\rho_{D_2}$, мм	Степень точности
	φ_x	φ_y	d_p , мм	d_t , мм	a , мм	γ_p , град	β_p , град	ε_p , град			
<i>При постоянном шаге УР</i>											
S44-8									5,690	1,26	–
S46-8									5,630	1,15	–
S48-8									5,560	1,05	–
S50-8	0	0	30	17	2,111	3	30	0	5,490	0,96	–
S52-8									5,420	0,89	–
S55-8									5,290	0,79	–
S60-8									5,070	0,67	–
S44-8	3,83								1,320		–
S46-8	3,64								0,770		–
S48-8	3,47								0,300		8
S50-8	3,31	0	30	17	2,108	3	29,91	0	0,240	0	7
S52-8	3,17								0,190		6
S55-8	2,97								0,140		6
S60-8	2,70								0,050		4
S44-8	3,83								0,070		
S46-8	3,64								0,060		
S48-8	3,47								0,046		
S50-8	3,31	9	30	16	2,081	12	20,89	81	0,037	0	4
S52-8	3,17								0,028		
S55-8	2,97								0,017		
S60-8	2,70								0,012		
S44-8	3,83	9	30	16	2,081	12	20,89	81	0,070		
S46-8	3,64	9	32	18	2,082	12	20,9	81	0,067		
S48-8	3,47	9	34	20	2,082	12	20,91	81	0,060		
S50-8	3,31	9	36	22	2,082	12	20,92	81	0,054	0	4
S52-8	3,17	7	38	24	2,082	12	20,93	83	0,066		
S55-8	2,97	7	41	27	2,093	10	20,94	83	0,052		
S60-8	2,70	7	46	32	2,093	10	20,95	83	0,040		
<i>При постоянном номинальном диаметре УР</i>											
S60-3	0,95								0,02		4
S60-8	2,70								0,03		4
S60-9	3,08	6	48	16	0,785	9	23,95	84	0,05	0	4
S60-12	4,28								0,18		6
S60-14	5,14								0,31		7

Примечание. Знак «–» означает, что степень точности не соответствует ГОСТ 25096–82.

Анализ полученных результатов позволяет заключить следующее:

- использование кинематической схемы резбобфрезерования с параллельными осями резьбы и ФОП ($\varphi_x = 0^\circ$, $\varphi_y = 0^\circ$) не позволяет формообразовать УР принятого типоразмера, что подтверждено ранее проведенными исследованиями [17–19];

- при угле $\varphi_x \neq 0^\circ$ обеспечивается значительное снижение геометрической погрешности профиля по сравнению с таковой для кинематической схемы с параллельными осями инструмента и резьбы, но не позволяет изготовить УР в соответствии с принятой степенью точности во всем диапазоне диаметров;

- если угол φ_x равен углу подъема резьбы, то геометрическая погрешность по среднему диаметру $\Delta r_{D_2} = 0$, а наибольшая геометрическая погрешность Δr_{\max} существенно падает;

- при уменьшении коэффициента резьбы и происходит снижение Δr_{\max} ;

- одновременное использование двух углов поворота ($\varphi_x \neq 0^\circ$, $\varphi_y \neq 0^\circ$) обеспечивает возможность формообразования согласно четвертой степени точности всех представленных резб при универсальности инструмента по номинальному диаметру ($P = \text{const}$), а также соответствие четвертой, шестой и седьмой степеням точности при универсальности по шагу ($D = \text{const}$);

- при применении специального инструмента можно увеличить его диаметр по сравнению с универсальным для одного типоразмера УР без снижения ее степени точности (во всех случаях достигается наивысшая четвертая степень точности); при этом благодаря увеличенному диаметру инструмента можно улучшить условия резания, повысить режимные параметры и производительность обработки при условии размещения большего количества зубьев;

- при универсальности по шагу УР требуется использовать меньший коэффициент k , чем при универсальности по номинальному диаметру УР из-за необходимости большего заглубления ФОП в заготовку.

Выводы

1. Применение новых кинематических схем формообразования УР инструментом общего положения за счет использования двух углов его поворота позволяет выполнять резьбу универсальной или специальной ФОП в соответствии с принятой степенью точности, что расширяет область резбобфрезерования для УР.

2. Предложенные кинематические схемы формообразования УР с помощью ФОП позволят изготавливать фрезерованием резьбу с малым углом одной из боковых сторон.

Литература

- [1] 4.5" 2500HP quintaplex fluid end. *spectraservices.net: веб-сайт*. URL: <https://spectraservices.net/products/fluid-ends/> (дата обращения: 23.05.2022).
- [2] Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2013, vol. 67, pp. 28–34, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2012.12.005>
- [3] Araujo A.C., Fromentin G. Modeling thread milling forces in mini-hole in dental metallic materials. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 623–628, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.228>
- [4] Jun M.B.G., Araujo A.C. Modeling of the thread milling operation in a combined thread/drilling operation: thrilling. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2010, vol. 132, no. 1, art. 014505, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4000944>
- [5] Sharma V.S., Fromentin G., Poulachon G. et al. Investigation of tool geometry effect and penetration strategies on cutting forces during thread milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 74, no. 5–8, pp. 963–971, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6040-z>
- [6] Kosarev V.A., Grechishnikov V.A., Kosarev D.V. Milling internal thread with planetary tool motion. *Russ. Engin. Res.*, 2009, vol. 29, no. 11, art. 1177, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X09110227>
- [7] Lee S.W., Kasten A., Nestler A. Analytic mechanistic cutting force model for thread milling operations. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 546–551, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.148>
- [8] Mohan L.V., Shunmugam M.S. Simulation of whirling process and tool profiling for machining of worms. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, vol. 185, no. 1–3, pp. 191–197, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.115>

- [9] 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, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.018>
- [10] Malkov O.V., Malkova L.D. Improving thread accuracy in machining components for rocket and space technologies. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, art. 200006, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133364>
- [11] 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>
- [12] SLee 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>
- [13] Wan M., Altintas Y. Mechanics and dynamics of thread milling process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, vol. 87, pp. 16–26, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.07.006>
- [14] Fromentin G., Poulachon G. Geometrical analysis of thread milling — Part 2: Calculation of uncut chip thickness. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, vol. 49, no. 1–4, pp. 81–87, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2401-4>
- [15] Malkov O.V., Karelskiy A.S. Rising the work uniformity of thread milling cutters in machining parts of rocket and space technology. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, art. 200005, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133363>
- [16] Мальков О.В., Лагойский И.Д. *Способ формообразования резьб*. Патент ФОП 2749276. Заявл. 17.07.2020, опубл. 07.06.2021.
- [17] Лагойский И.Д. Повышение точности формообразования резьбы по планетарной кинематической схеме инструментом общего положения. *Будущее машиностроения России. 14 Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, с. 15–25.
- [18] Лагойский И.Д., Мальков О.В. Обеспечение точности фрезерования резьб. *Машиностроение: традиции и инновации. Мат. XIII всерос. конф.* Москва, МГТУ СТАНКИН, 2020, с. 216–223.
- [19] Лагойский И.Д., Мальков О.В. Анализ способов резьбофрезерования. *Всерос. науч.-метод. конф.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 60–64.

References

- [1] 4.5" 2500HP Quintaplex fluid end. *spectraservices.net: website*. URL: <https://spectraservices.net/products/fluid-ends/> (accessed: 23.05.2022).
- [2] Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2013, vol. 67, pp. 28–34, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.12.005>
- [3] Araujo A.C., Fromentin G. Modeling thread milling forces in mini-hole in dental metallic materials. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 623–628, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.228>
- [4] Jun M.B.G., Araujo A.C. Modeling of the thread milling operation in a combined thread/drilling operation: thrilling. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2010, vol. 132, no. 1, art. 014505, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4000944>
- [5] Sharma V.S., Fromentin G., Poulachon G. et al. Investigation of tool geometry effect and penetration strategies on cutting forces during thread milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 74, no. 5–8, pp. 963–971, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6040-z>
- [6] Kosarev V.A., Grechishnikov V.A., Kosarev D.V. Milling internal thread with planetary tool motion. *Russ. Engin. Res.*, 2009, vol. 29, no. 11, pp. 1177–1179, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X09110227>
- [7] Lee S.W., Kasten A., Nestler A. Analytic mechanistic cutting force model for thread milling operations. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 546–551, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.148>
- [8] Mohan L.V., Shunmugam M.S. Simulation of whirling process and tool profiling for machining of worms. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, vol. 185, no. 1–3, pp. 191–197, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.115>

- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] SLee 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>
- [13] Wan M., Altintas Y. Mechanics and dynamics of thread milling process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, vol. 87, pp. 16–26, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.07.006>
- [14] Fromentin G., Poulachon G. Geometrical analysis of thread milling — part 2: calculation of uncut chip thickness. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, vol. 49, no. 1–4, pp. 81–87, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2401-4>
- [15] Malkov O.V., Karelskiy A.S. Rising the work uniformity of thread milling cutters in machining parts of rocket and space technology. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, no. 1, art. 200005, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133363>
- [16] Mal'kov O.V., Lagoyskiy I.D. *Sposob formoobrazovaniya rez'b* [Method of thread shaping]. Patent RU 2749276. Appl. 17.07.2020, publ. 07.06.2021. (In Russ.).
- [17] Lagoyskiy I.D. [Improving accuracy of thread milling with epicyclic kinematic scheme using general tools]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii. 14 Vseros. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov* [Future of Russian Machine Building. 14th Russ. Conf. of Young Scientists and Specialists]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021, pp. 15–25. (In Russ.).
- [18] Lagoyskiy I.D., Mal'kov O.V. [Providing accuracy of thread milling]. *Mashinostroenie: traditsii i innovatsii. Mat. XIII vseros. konf.* [Machine Building: Traditions and Innovations. Proc. XIII Russ. Conf.]. Moscow, MGTU STANKIN Publ., 2020, pp. 216–223. (In Russ.).
- [19] Lagoyskiy I.D., Mal'kov O.V. [Analysis of thread formation methods]. *Vserossiyskaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya* [Russ. Sci.-Method. Conf.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020, pp. 60–64. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 20.06.2022

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).

ЛАГОЙСКИЙ Илья Дмитриевич — аспирант кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: ilagoyskiy@gmail.com).

Information about the authors

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).

LAGOYSKIY Ilya Dmitrievich — Postgraduate, Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ilagoyskiy@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-1-21-32)

Please cite this article in English as:

Malkov O.V., Lagoyskiy 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, doi: [10.18698/0536-1044-2023-1-21-32](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-1-21-32)